

**Zum Einfluss schwindreduzierender Zusatzmittel und Wirkstoffe auf das
autogene Schwinden und weitere Eigenschaften von Zementstein**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

an der Fakultät Bauingenieurwesen

der

Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Patrick Schäffel

geboren am 26. Mai 1977 in Erfurt

Weimar 2009

Gutachter

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jochen Stark

Prof. Dr.-Ing. Gerd Thielen

Univ. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit

Tag der Disputation: 10. September 2009

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hier nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich versichere ehrenwörtlich, dass ich nach bestem Wissen die reine Wahrheit gesagt und nichts verschwiegen habe.

Weimar, 29. September 2009

Vorwort

Die vorliegende Dissertation wurde in den Jahren 2003 bis 2009 am Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf erstellt. Sie wurde durch die Wissenschaftsstiftung der deutschen Zementindustrie „Gerd-Wischers-Stiftung“ im Verein Deutscher Zementwerke e. V. gefördert. Ihr sei hierfür gedankt. Dem Verein Deutscher Zementwerke und seiner Geschäftsführung danke ich für die Förderung der Arbeit und die Möglichkeit, die Einrichtungen des Forschungsinstitutes für die Durchführung dieser Arbeit zu nutzen.

Die Dissertation wurde betreut von Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerd Thielen. Ihm, den Herren Dr.-Ing. Jörg Rickert und Dr. rer. nat. Gerhard Spanka sowie Frau Dr.-Ing. Elke Schäfer gilt mein Dank für die Unterstützung bei der Konzeption der Arbeit und die Durchführung der Untersuchungen sowie für die wertvollen Diskussionen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Jochen Stark, Bauhaus-Universität Weimar, und Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit, Technische Universität Kaiserslautern, danke ich für ihr Interesse an dieser Arbeit und für ihre wertvollen Anregungen bei der Abfassung der Dissertationschrift.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Forschungsinstituts, insbesondere denen der Abteilungen Betontechnik und Zementchemie, gilt mein besonderer Dank für ihre Unterstützung bei den Versuchen und für ihre Diskussionsbereitschaft.

Ein Teil der Ergebnisse dieser Arbeit stammt aus einem Forschungsvorhaben, das durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) finanziert wurde. Ihr sei hierfür gedankt.

Ganz herzlich danke ich meiner Familie, insbesondere meiner Frau Yvonne. Sie hat mich mit viel Geduld und trotz vieler Entbehrungen immer wieder motiviert und damit zu dem erfolgreichen Abschluss der Arbeit beigetragen.

1	EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG	1
2	STAND DER KENNTNISSE	2
2.1	Schwinden von Zementstein und Beton	2
2.1.1	Allgemeines	2
2.1.2	Kapillar- oder Frühschwinden	2
2.1.3	Gesamtschwinden	3
2.1.3.1	Autogenes Schwinden	3
2.1.3.2	Trocknungsschwinden	5
2.1.4	Carbonatisierungsschwinden	6
2.2	Zementsteinmodelle und Schwindmechanismen	6
2.2.1	Allgemeines	6
2.2.2	Modell nach Powers	7
2.2.3	Modell nach Feldmann und Sereda	7
2.2.4	Zementsteinmodell nach Wittmann und Setzer	8
2.2.4.1	Münchner Modell	8
2.2.4.2	Grundlagen der Spaltdrucktheorie	10
2.2.5	Das Feststoff-Porenwassersystem des Zementgels (SLGS Modell)	13
2.2.6	Modellvorstellungen nach Jennings	13
2.2.7	Zementsteinstruktur nach Stark und Möser	14
2.3	Methoden der Schwindreduzierung	15
2.3.1	Allgemeines	15
2.3.2	Quellzemente	16
2.3.3	Schwindreduzierung durch innere Nachbehandlung	17
2.4	Organische schwindreduzierende Zusatzmittel	17
2.4.1	Allgemeines	17
2.4.2	Einfluss auf die Oberflächenspannung der Porenlösung	18
2.4.3	Einfluss auf die Zementleim-, Frischmörtel- und Frischbetoneigenschaften	20
2.4.4	Einfluss von SRA auf das Schwinden von Zementstein, Mörtel und Beton	20
2.4.4.1	Allgemeines	20
2.4.4.2	Zementstein und Mörtel	20
2.4.4.3	Beton	21
2.4.5	Druckfestigkeit	23
2.4.6	Porengefüge	24
2.4.7	Hydratation	24
2.4.8	Dauerhaftigkeitsrelevante Parameter	25

2.4.9	Weiterentwicklung von SRA	26
2.4.10	Anwendungsgebiete von SRA	27
2.4.11	Zusammenfassung	28
3	ZIEL DER UNTERSUCHUNGEN UND LÖSUNGSWEG	30
3.1	Ziel	30
3.2	Lösungsweg	30
4	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	32
4.1	Ausgangsstoffe	32
4.1.1	Zement	32
4.1.2	Zusatzmittel und Wirkstoffe	32
4.1.3	Gesteinskörnung	33
4.1.4	Zugabewasser	33
4.2	Zusammensetzung, Herstellung und Lagerung	34
4.2.1	Zementleim	34
4.2.2	Mörtel	34
4.3	Angewendete Untersuchungsmethoden und –verfahren	35
4.3.1	Charakterisierung der Zusatzmittel und Wirkstoffe	35
4.3.1.1	Bestimmung der Oberflächenspannung	35
4.3.1.2	IR-Spektroskopie	35
4.3.1.3	Gaschromatographie	35
4.3.2	Charakterisierung der Porenlösung	35
4.3.2.1	Gewinnen von Porenlösung	35
4.3.2.2	Bestimmung der Oberflächenspannung	36
4.3.2.3	Chemische Analysen	36
4.3.3	Untersuchungen an Zementleim und Frischmörtel	36
4.3.4	Untersuchungen an Zementstein	37
4.3.4.1	Versuchsumfang	37
4.3.4.2	Autogenes Schwinden	38
4.3.4.3	Trocknungsschwinden von Zementmörtel	42
4.3.4.4	Trocknungsschwinden von Zementstein bei unterschiedlicher relativer Luftfeuchte	42
4.3.4.5	Quecksilberintrusion	42
4.3.4.6	Innere relative Feuchte von Zementstein	43
4.3.4.7	Hydratationswärmeentwicklung	44
4.3.4.8	Rasterelektronenmikroskopie	44

5	DARSTELLUNG UND ERÖRTERUNG DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE	45
5.1	Eigenschaften von Schwindreduzierern und deren wässriger Lösungen	45
5.1.1	Auswahl, Nachweis und Identifizierung der Schwindreduzierer	45
5.1.2	Struktur und chemische Eigenschaften der SRA und Wirkstoffe	46
5.1.3	Oberflächenspannung der wässrigen Lösung	48
5.1.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	50
5.2	Einfluss von SRA auf die Zementleimeigenschaften	50
5.2.1	Allgemeines	50
5.2.2	Konsistenz	51
5.2.3	Luftgehalt	53
5.2.4	Zusammenfassung	54
5.3	Einfluss von SRA auf die Eigenschaften von Zementstein bei konservierenden Lagerungsbedingungen	54
5.3.1	Allgemeines	54
5.3.2	Einfluss auf die Porenlösung	54
5.3.2.1	Oberflächenspannung der Porenlösung	54
5.3.2.2	SRA-Konzentration in der Porenlösung	56
5.3.2.3	Alkaliionenkonzentration in der Porenlösung	58
5.3.2.4	Zusammenfassung	58
5.3.3	Autogenes Schwinden von Zementstein	59
5.3.3.1	Allgemeines	59
5.3.3.2	Zementstein ohne schwindreduzierende Zusatzmittel	59
5.3.3.3	Zementstein mit SRA	61
5.3.3.4	SRA und Portlandzementstein CEM I	62
5.3.3.5	SRA und Portlandzementstein CEM Ia	67
5.3.3.6	SRA und HS-Portlandzementstein CEM I-HS	68
5.3.3.7	SRA und Portlandkalksteinzementstein CEM II	69
5.3.3.8	SRA und Hochofenzementstein CEM III	70
5.3.3.9	Wirkung der SRA in Abhängigkeit von der Zementart	71
5.3.3.10	Zusammenhang zwischen Oberflächenspannung der Porenlösung und autogenem Schwinden	76
5.3.3.11	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	77
5.3.4	Porengefüge von Zementstein	78
5.3.4.1	Allgemeines	78
5.3.4.2	Gesamtporosität und Porenradienverteilung von Zementstein ohne SRA	78
5.3.4.3	Einfluss der SRA auf die Gesamtporosität und Porenradienverteilung von Zementstein	80
5.3.4.4	Einfluss des Schwindreduzierers SRA3	81
5.3.4.5	Einfluss des Wirkstoffs W1	82

5.3.4.6	Einfluss des Wirkstoffs W2	84
5.3.4.7	Schlussfolgerungen	85
5.3.5	Innere relative Feuchte von Zementstein	86
5.3.5.1	Allgemeines	86
5.3.5.2	Zementstein ohne schwindreduzierende Zusatzmittel	86
5.3.5.3	Einfluss von SRA auf die innere relative Feuchte von Zementstein	87
5.3.5.4	Zusammenhang zwischen innerer relativer Feuchte und autogenem Schwinden	90
5.3.5.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	92
5.3.6	Übergreifende Zusammenhänge	93
5.3.6.1	Allgemeines	93
5.3.6.2	Sättigungsradius	94
5.3.6.3	Wirksamer Porenanteil	97
5.3.6.4	Wirksame Kapillarspannungen	99
5.3.6.5	Schlussfolgerungen	102
5.4	Einfluss von SRA auf das Trocknungsschwinden von Zementstein	103
5.4.1	Schwinden bei unterschiedlicher relativer Luftfeuchte	103
5.4.1.1	Allgemeines	103
5.4.1.2	Portlandzementstein CEM I mit SRA	103
5.4.1.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	107
5.4.2	Trocknungsschwinden von Zementmörtel zur Überprüfung der Zusammenhänge am Zementstein	107
5.4.2.1	Allgemeines	107
5.4.2.2	Zementmörtel mit Portlandzement CEM I	108
5.4.2.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	110
5.4.3	Hydratation von Zement	111
5.4.3.1	Allgemeines	111
5.4.3.2	Hydratationswärmeentwicklung	111
5.4.3.3	Rasterelektronenmikroskopische Gefügeuntersuchungen	112
5.4.3.4	Schlussfolgerungen	113
6	MODELL ZU DEN WIRKUNGSMECHANISMEN SCHWINDREDUZIERENDER ZUSATZMITTEL UND WIRKSTOFFE IN ZEMENTSTEIN	114
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	121
7.1	Ausgangssituation	121
7.2	Eigenschaften von Schwindreduzierern und deren wässriger Lösungen	121
7.3	Einfluss von SRA auf die Zementleimeigenschaften	121

7.4	Einfluss von SRA auf die Eigenschaften von Zementstein bei konservierenden Lagerungsbedingungen	122
7.4.1	Porenlösung	122
7.4.2	Autogenes Schwinden	122
7.4.3	Porengefüge	122
7.4.4	Innere relative Feuchte	123
7.4.5	Übergreifende Zusammenhänge	123
7.5	Einfluss von SRA auf das Trocknungsschwinden von Zementstein und Mörtel	123
7.6	Modell zu den Wirkungsmechanismen schwindreduzierender Zusatzmittel und Wirkstoffe	124
7.7	Kritische Bewertung der marktüblichen SRA	124
7.8	Ausblick	125
8	LITERATURVERZEICHNIS	127
8.1	Literatur	127
8.2	Normen und Regelwerke	140
9	ANHANG A – TABELLEN	142
10	ANHANG B – BILDER	159

Formelzeichen/Abkürzung	Bedeutung
Π	Spaltdruck in Pa
γ	Oberflächenspannung in mN/m
BET-Oberfläche	Spezifische Oberfläche in m ² /g, bestimmt mit dem Verfahren nach B runauer, E mmett und T eller
C-S-H	Calcium-Silicat-Hydrat
DCA	Differenzial-Wärmefluss-Kalorimeter (engl.: D ifferential C alorimetric A nalysis)
ESEM	Atmosphärisches Rasterelektronenmikroskop (engl.: E nvironmental E lektron S canning M icroscope)
HD C-S-H	engl. high density C-S-H: C-S-H mit hoher Dichte
HD-PE	Hochdichtes Polyethylen
IR-Spektroskopie	Infrarot-Spektroskopie
LD C-S-H	engl. low density C-S-H: C-S-H mit geringer Dichte
LP-Bildner	L uft p oren B ildner
M.-% v. w	Masseprozent vom Zugabewasser
M.-% v. z	Masseprozent vom Zementgehalt
PCE	P olycarboxylatether
r. F.	relative Feuchte
REM	R aster- E lektronen m ikroskopie
SAP	Superabsorbierendes Polymer (engl.: S uperabsorbent P olymer)
TOC	Gesamter organischer gebundener Kohlenstoff (engl.: T otal O rganic C arbon)
UHPC	Ultrahochfester Beton (engl.: Ultra H igh P erformance C oncrete)
PEG	P olyethylenglykol
20/65	Klima 20 °C und 65 % relative Luftfeuchte

Zement bzw. daraus hergestellter Leim bzw. Zementstein

CEM I	Portlandzement CEM I 42,5 R
CEM Ia	Portlandzement CEM I 42,5 R (CEM I) mit einem Na_2O -Äquivalent von 1,20 M.-%, aufdotiert mit KOH
CEM I-HS	Portlandzement CEM I 42,5 R-HS
CEM II	Portlandkalksteinzement CEM II/A-LL 42,5 R
CEM III	Hochofenzement CEM III/A 42,5 N

Schwindreduzierer und Wirkstoffe

SRA	schwindreduzierende Zusatzmittel (engl.: Shrinkage Reducing Admixture)
SRA1	Schwindreduzierer 1 - auf Basis von Neopentylglykol
SRA2	Schwindreduzierer 2 - auf Basis von Polyoxyalkylen Alkylether
SRA3	Schwindreduzierer 3 - auf Basis von Dipropylenglykol (DPG) und Dipropylenglykol-tert.-butyl-ether (DPTB)
W1	SRA-Wirkstoff W1 - Dipropylenglykol
W2	SRA-Wirkstoff W2 - Dipropylenglykol-tert.-butyl-ether (DPTB)

1 Einleitung und Problemstellung

Das Schwinden von Beton führt zu Verformungen, die bei Behinderung Spannungen im Betonbauteil hervorrufen können. Dadurch können z. B. Mikrorisse, Oberflächenrisse oder Trennrisse entstehen, die die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit des Betonbauteils beeinträchtigen können. Infolge des Schwindens nimmt das Risiko einer Rissbildung, insbesondere bei großflächigen Bauteilen, wie beispielsweise Bodenplatten oder Tunnelschalen zu.

Während bei Herstellung von Betonbauteilen aus normalfestem Beton hauptsächlich das Trocknungsschwinden zu beachten ist, gewinnt das durch innere Austrocknung (Selbstaustrocknung) hervorgerufene autogene Schwinden infolge des zunehmenden Einsatzes von Betonen mit niedrigen Wasserzementwerten bzw. von hochfesten Betonen im Betonbau an Bedeutung.

Sowohl Planungsingenieure als auch Betontechnologen sind bestrebt, durch konstruktive, betontechnologische sowie ausführungstechnische Maßnahmen das Schwinden von Beton so weit wie möglich zu reduzieren. Maßnahmen, wie z. B. die Optimierung des Bindemittelgehalts können zu einer Minimierung des Schwindens beitragen. Durch das Aufbringen von Folien-Trennlagen können Zwangsspannungen zwischen vorhandenen Betonbauteilen und nachträglich aufgetragenen Beton minimiert werden. Auch die Planung von geeigneten Betonierabschnitten kann das Risiko einer Rissbildung in Folge Schwindens reduzieren. Durch sorgfältige Nachbehandlung kann das Schwinden im jungen Alter minimiert und somit die Rissanfälligkeit in diesem Zeitraum vermindert werden.

Darüber hinaus stehen seit Anfang der 1980er-Jahre Zusatzmittel der bauchemischen Industrie zur Verfügung, die das Schwinden reduzieren können. So genannte schwindreduzierende Zusatzmittel (engl. **Shrinkage Reducing Admixture – SRA**) wurden in Japan entwickelt, um das Schwinden von Betonbauteilen abzumindern. Seit Ende der 90er-Jahre werden sie auch in Europa eingesetzt. Wissenschaftlich begründete Kenntnisse über die Wirkungsmechanismen fehlen bislang jedoch noch weitgehend.

In der vorliegenden Arbeit wurden daher die Wirkungsmechanismen schwindreduzierender Zusatzmittel und darin enthaltener Wirkstoffe in Zementstein untersucht.

2 Stand der Kenntnisse

2.1 Schwinden von Zementstein und Beton

2.1.1 Allgemeines

Als Schwinden werden lastunabhängige äußere Volumenänderungen von Beton bezeichnet, die durch Veränderungen des Wasserhaushalts im Beton verursacht werden [Gru 03]. Umweltbedingte oder durch innere Austrocknung hervorgerufene Änderungen des Wasserhaushalts im Beton führen zu Veränderungen der inneren Kräfte der Zementsteinmatrix. Dabei entstehen Zugspannungen im Zementsteingefüge, die zum Zusammenziehen der Matrix führen können [Wit 77]. Die im Beton auftretenden Schwindverformungen hängen vom Volumenanteil der Zementsteinmatrix sowie von der Verformbarkeit (Elastizitätsmodul) des Zementsteins und der Gesteinskörnungen ab [Gru 91]. Das Schwindmaß des Betons wird somit von der Umgebungsfeuchte, von den Bauteilabmessungen sowie der Betonzusammensetzung bestimmt [Gru 91, Wit 75]. Das Schwinden von Beton kann man nach dem Zeitraum des Auftretens oder nach der Ursache für die Veränderung des Wasserhaushalts in folgende Arten einteilen [Gru 91]:

- Kapillar- oder Frühschwinden
- Gesamtschwinden, bestehend aus:
 - Autogenem Schwinden und
 - Trocknungsschwinden
- Carbonatisierungsschwinden

Diese Schwindarten werden im Folgenden kurz zusammenfassend erläutert.

2.1.2 Kapillar- oder Frühschwinden

Als Kapillarschwinden, auch bezeichnet als Frühschwinden oder plastisches Schwinden, werden die äußeren Verformungen des frischen Betons in Folge von Wasserverlust über die Betonoberfläche bezeichnet [Gru 03]. Unter ungünstigen Bedingungen kann die Verformung durch Kapillarschwinden bis zu rd. 4 mm/m betragen [Jae 68]. Derart große Längenänderungen können Risse mit Breiten zwischen rd. 0,5 mm und rd. 2 mm hervorrufen. Oft reichen Kapillarschwindrisse bis tief in das Bauteil hinein und geben die Lage durchgehender Risse vor, wenn im weiteren Erhärtungsverlauf weitere Zugspannungen auftreten z. B. infolge Trocknungsschwinden [Gru 91]. Erklärt werden können derart große Risse durch eine dichtere Lagerung der zunächst in einer Suspension vorliegenden Feststoffpartikel im oberflächennahen Bereich auf Grund von Wasserverlust an die Umgebung. Sobald die feinen Feststoffpartikel infolge innerer Reibung nicht weiter zusammenrücken oder sedimentieren können, führt ein zunehmender Verlust von Wasser zu einer Abnahme der Dicke des Wasserfilms auf den Feststoffpartikeln und zu einer Ausbildung von Menisken. Somit entstehen Kapillarzugspannungen,

die mit kleiner werdenden Krümmungsradien der Menisken zunehmen [Gru 91, Gru 03, Wit 75].

Die zunehmende Steifigkeit der Bindemittelmatrix wirkt den Kapillarkräften des Porenwassers entgegen. Dadurch nimmt die Geschwindigkeit des Kapillarschwindens mit zunehmendem Alter ab [Wit 75]. Zudem trägt die Gesteinskörnung zu einer Verformungsbehinderung bei.

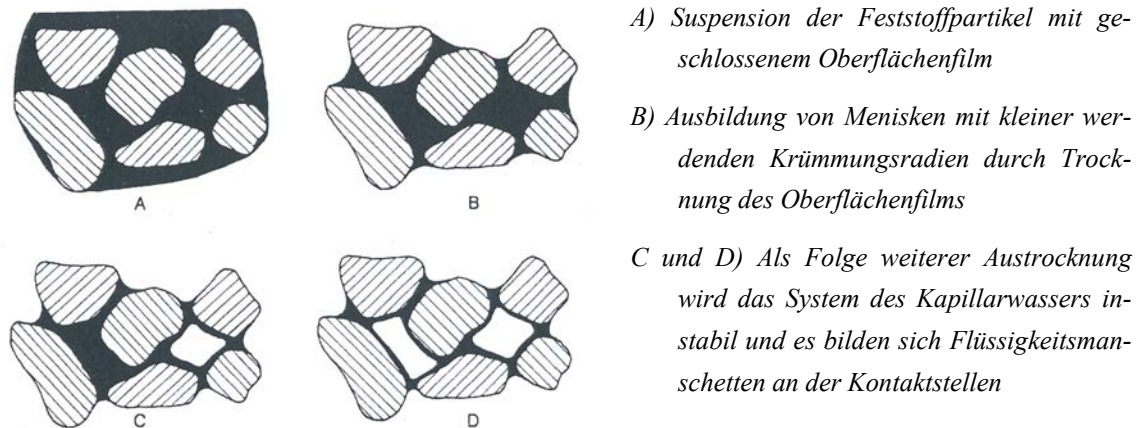


Bild 2-1 Zweidimensionale Darstellung einer Suspension aus Feststoffpartikeln und Wasser im Frischbeton nach [Wit 75]

Das Kapillarschwinden ist die einzige Schwindart, die durch eine gezielte Nachbehandlung minimiert werden kann. Geeignete Nachbehandlungsverfahren sind beispielsweise das Abdecken des Betons mit Folien, das Aufbringen von wasserspeichernden Abdeckungen, das Aufbringen von flüssigen Nachbehandlungsmitteln oder das Besprühen mit Wasser [Web 07].

2.1.3 Gesamtschwinden

2.1.3.1 Autogenes Schwinden

Bereits in den 1940er-Jahren beschrieben Powers und Brownyard [Pow 46], dass die Summe der Ausgangsvolumina von Zement und Wasser größer ist als das Volumen der daraus gebildeten Hydratphasen. Grund dafür ist, dass in Hydrate eingebundenes Wasser eine größere Dichte aufweist als freies Wasser. Bei vollständiger Hydratation verliert der chemisch gebundene Teil des Zugabewassers rd. 6 cm^3 je 100 g Zement [Cze 77, Gru 91, Loc 00]. Hydratisiert Zement bei einem Wasserzementwert von $w/z = 0,40$ vollständig, beträgt das Volumen des Zementsteins noch etwa 92 % des Volumens des Zementleims. Diese Volumenverringerung wird als „chemisches Schwinden“ bezeichnet.

Durch die fortschreitende Hydratation wird die Verfügbarkeit von freiem Wasser herabgesetzt, und der hydratisierende Zement verbraucht Wasser aus den Kapillarporen. Die entstehenden Hydratationsprodukte wachsen dabei in die verfügbaren wassergefüllten Hohlräume der Suspension und des Zementsteins bis alle reaktionsfähigen Bestandteile des Zements umgesetzt sind oder kein Wasser mehr zur Verfügung steht [Gru 03]. Dabei können Teile der zu Beginn der Hydratation noch wassergefüllten Porenräume entleert werden [Gru 91, Per 97]. Man spricht dabei von einer so genannten inneren Austrocknung (Selbstaustrocknung). Diese Selbstaustrocknung führt insbesondere in Zementstein mit Wasserzementwerten unter $w/z = 0,50$ in Verbindung mit vollständiger konservierender Lagerung, d. h. ohne Abgabe von Wasser an die Umgebung, zu einem Absinken der inneren relativen Feuchte unter 100 %.

Der Volumenänderung auf Grund des chemischen Schwindens steht ab dem Erhärtungsbeginn durch die feste Anordnung der Zementpartikel ein Verformungswiderstand entgegen. Die Selbstaustrocknung wird dadurch verstärkt. Die Folge ist das makroskopisch messbare autogene Schwinden.

In Bild 2-2 ist die zeitliche Entwicklung der Zementleim- und Zementsteinverformungen schematisch dargestellt. Im Zementleim liegt der Zement direkt nach dem Anmischen in einer Suspension vor. In dieser Suspension entspricht das autogene Schwinden weitestgehend dem chemischen Schwinden. Mit fortschreitender Hydratation wirkt die zunehmende Steifigkeit des Zementsteins dem autogenen Schwinden entgegen und autogenes und chemisches Schwinden unterscheiden sich zunehmend.

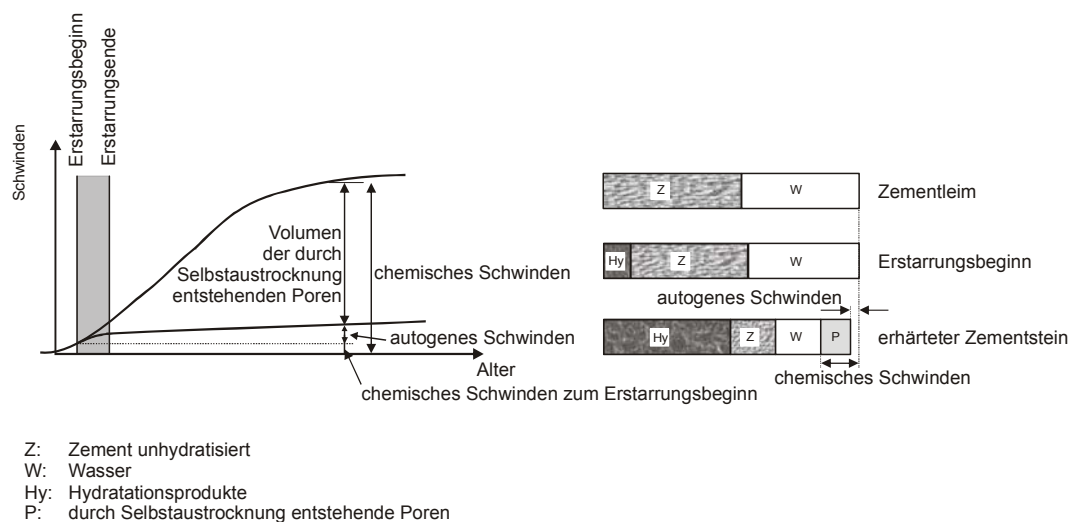


Bild 2-2 Zusammenhang zwischen chemischem und autogenem Schwinden in Anlehnung an [Taz 98]

Die Selbstaustrocknung und damit die Größe des autogenen Schwindens sind vom Wasserzementwert abhängig. Je kleiner der Wasserzementwert eines Betons ist, desto höher

ist der Anteil des autogenen Schwindens. Fällt die relative Feuchte im Porenraum des Zementsteins unter 80 %, kommt die Hydratation zum Stillstand [Bar 99, Jen 95, Pow 46].

Mit Portlandzement hergestellter Zementstein mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,40$ weist im Alter von 28 Tagen eine Längenänderung von etwa 0,7 mm/m bis 0,8 mm/m infolge autogenen Schwindens auf [Gru 91, Gru 03]. Bei Wasserzementwerten kleiner als $w/z = 0,40$ können die autogenen Schwindverformungen weitaus größer sein. Zementstein mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,25$ weist nach 28 Tagen je nach Zementart ein autogenes Schwindmaß von rd. 2,3 mm/m auf.

Betone mit niedrigem Wasserzementwert und hohem Bindemittelgehalt weisen im Vergleich zu Normalbeton hohe autogene Endschwindmaße auf, die im Hinblick auf eine Zwangsrissbildung im jungen Alter nicht zu vernachlässigen sind [Alo 02]. Für hochfeste Betone kann das autogene Schwinden bis zu rd. 0,4 mm/m betragen [Alo 02]. Bei ultrahochfesten Betonen ist das autogene Schwinden durch sehr hohe Bindemittelgehalte und extrem niedrige Wasserzementwerte noch größer und kann bis rd. 0,9 mm/m betragen [Epp 08]. Diese Ergebnisse zeigen, dass das autogene Schwinden von Betonbauteilen mit niedrigen Wasserzementwerten und hohen Bindemittelgehalten von großer Bedeutung ist.

2.1.3.2 Trocknungsschwinden

Durch die Abgabe von Wasser (Verdunstung) über die Bauteiloberfläche an die Umgebung verkürzt sich Beton lastunabhängig. Dieses Verhalten wird als Trocknungsschwinden bezeichnet. Der Beton bzw. Zementstein gibt so lange Wasser ab, bis er mit der relativen Luftfeuchte seiner Umgebung im Gleichgewicht steht. Da dieser Prozess diffusionsgesteuert abläuft, kann es je nach Bauteilgröße sehr lange dauern bis das Gleichgewicht erreicht ist. Somit wird jedes Bauteil bei konstanten Umgebungsbedingungen ein endliches Schwindmaß erreichen.

Das Trocknungsschwinden von Beton kann unter bestimmten Bedingungen die Gebrauchstauglichkeit und auch die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen beeinträchtigen. Durch das Schwinden der Zementstein- oder Bindemittelmatrix können Mikrorisse in der Matrix und/oder in der Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung hervorgerufen werden. In Bauteilen mit vollständiger Verformungsbehinderung können Zwangsspannungen in Folge Trocknungsschwindens unter ungünstigen Bedingungen Spalt- oder Trennrissen hervorrufen. Spaltrisse können die Funktion wasserundurchlässiger Bauteile beeinträchtigen [Gru 91]. In massigen Bauteilen können durch Austrocknung der Bauteiloberfläche nennenswerte Feuchtegradienten hervorgerufen werden. Dadurch auftretende innere Zwangsspannungen (Eigenspannungen) können zu Rissen auf der Bauteiloberfläche führen. Bei Spannbeton können sich durch Spannungsumlagerungen Verluste der Vorspannkraft ergeben.

Sowohl das autogene Schwinden als auch das Trocknungsschwinden können auf die Austrocknung der Poren innerhalb der Hydrate des Zementsteins zurückgeführt werden.

Beim autogenen Schwinden trocknen die Poren durch die Selbstaustrocknung infolge fortschreitender Hydratation aus. Beim Trocknungsschwinden wird Wasser aus den Poren an die Umgebung abgegeben [Gru 03]. Mit zunehmendem Wasserzementwert nimmt der Anteil des autogenen Schwinden an der Gesamtschwindverformung eines Bauteils ab und der Anteil des Trocknungsschwindens zu.

2.1.4 Carbonatisierungsschwinden

Das bei der Hydratation von Portlandzementklinker entstehende Calciumhydroxid bildet mit dem aus der Luft eindiffundierten und im Porenwasser gelösten Kohlendioxid Calciumcarbonat und Wasser. Dieser Vorgang wird als Carbonatisierung des Zementsteins bezeichnet. Das gebildete Calciumcarbonat weist je nach Modifikation (Aragonit, Calcit oder Vaterit) ein bis zu rd. 19 % größeres Volumen auf als die Ausgangsstoffe Calciumhydroxid und Kohlendioxid [Sta 01].

Dennoch ruft die Carbonatisierung eine Schwindverformung des Zementsteins hervor. Diese kann durch Veränderungen in der Porenstruktur erklärt werden. Durch eine Vergrößerung der inneren Oberfläche und die Freisetzung von zuvor molekular eingebundenem Wasser kommt es zu einer erhöhten inneren relativen Feuchte in den carbonatisierten Bereichen. Damit der carbonatisierte Zementstein mit der Umgebungsfeuchte ins Gleichgewicht kommt, verdunstet mehr Wasser. Das sogenannte Carbonatisierungsschwinden ist die Folge [Gru 91, Sta 01]. Die Auswirkungen des Carbonatisierungsschwindens auf das Gesamtschwindmaß ganzer Betonbauteile sind eher von untergeordneter Bedeutung, da es sich i. d. R. nur auf oberflächennahe Bereiche des Gesamtquerschnittes bezieht [Gru 91]. Dennoch können diese Schwinddehnungen zu fein verteilten Rissen auf Betonoberflächen führen [Sta 01].

2.2 Zementsteinmodelle und Schwindmechanismen

2.2.1 Allgemeines

Die physikalischen Eigenschaften des Zementsteins sind im Wesentlichen von der Struktur der Hydratationsprodukte und der Bindungsart des Wassers abhängig. Der Einfluss der Feuchtigkeit auf das hygrische Verformungsverhalten von Zementstein wurde in der Vergangenheit anhand verschiedener mikrostruktureller Zementsteinmodelle beschrieben. Einige dieser in der Literatur vorliegenden Modelle wurden in einer Reihe von Arbeiten bereits umfassend dargestellt und diskutiert [Duc 08, Gru 91, Jen 04, Loc 00, Sta 00, Wit 77].

In den folgenden Abschnitten werden die am häufigsten angewendeten Zementsteinmodelle zusammenfassend kurz beschrieben. Darüber hinaus werden die wesentlichen Bestandteile des Schwindmodells nach Powers und des sogenannten „Münchener Modells“ kurz zusammenfassend erläutert.

2.2.2 Modell nach Powers

In den Modellvorstellungen nach Powers [Pow 58] hydratisiert Zement mit Wasser zu einem Netz aus kolloidalen Hydratationsprodukten, die als Zementgel bezeichnet werden. Das Gel besteht hierbei im Wesentlichen aus Calcium-Silikat-Hydraten, nicht hydratisiertem Zement, Calciumhydroxid und Wasser. Das Wasser liegt im Zementgel als Kristallwasser (chemisch eingebunden in Hydratationsprodukten), als Gelwasser (adsorbiert an Gelpartikeln) und als Kapillarporenwasser vor.

Auf Basis des o. g. Zementsteinmodells entwickelte Powers ein Modell zur Beschreibung des Kriechens und Schwindens von Zementsteins [Pow 68]. Das Modell basiert auf der Annahme, dass sich, ausgehend von einem vollkommen trockenen Zementstein, auf der freien Oberfläche des Zementgels Schichten aus Wassermolekülen anlagern, deren Dicke mit steigender Umgebungsfeuchte zunehmen. Mit beginnender Anlagerung von Wassermolekülen an den Oberflächen wird die Oberflächenenergie des Zementsteins abgebaut. Mit zunehmender Ausbildung dickerer Wasserschichten und bei geringen Abständen gegenüberliegender Zementsteinflächen können sich die adsorbierten Schichten aus Wassermolekülen nicht mehr voll ausbilden und das Wasser kondensiert an diesen Stellen (s. Bild 2-3). Dabei bilden sich Menisken aus. Das kapillarkondensierte Wasser übt einen Spaltdruck („disjoining pressure, „hindered adsorption“) auf die Flächen des Zementgels aus, dem die Steifigkeit der Porenstruktur und die van der Waals-Kräfte entgegenstehen. Bei relativen Feuchten über 50 % r. F. werden die Schwindverformungen zusätzlich durch den hydrostatischen Druck des kapillarkondensierten Wassers im Porensystem beeinflusst.

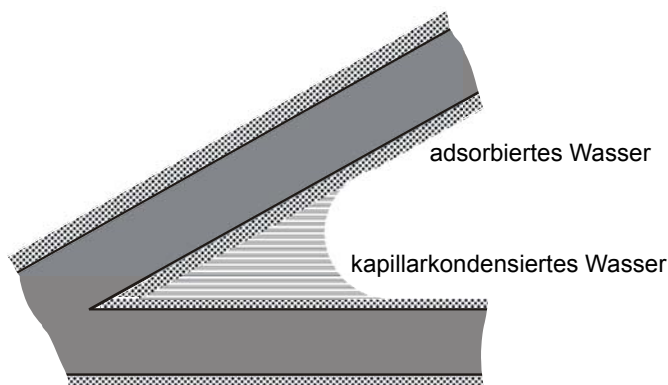


Bild 2-3 Keilförmiger Spalt mit adsorbiertem und kapillarkondensiertem Wasser [Pow 68]

2.2.3 Modell nach Feldmann und Sereda

Feldman und Sereda [Fel 68] entwickelten das von Powers vorgeschlagene Modell anhand von Stickstoffsorptionsmessungen weiter. Sie leiteten ein Modell ab, nach dem Zwischenschichtwasser einen dominanten Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften

ten von Zementstein hat. In dem Modell wird zwischen adsorbierten Wasser und Zwischenschichtenwasser unterschieden. Bei der Wasseraufnahme des Zementsteins wird adsorbiertes- und Zwischenschichtenwasser in die Struktur eingebaut.

Das Zementgel besteht nach diesen heute veralteten Vorstellungen aus aufgerollten Schichten, das zum Teil Zwischenschichtwasser als Bestandteil des Feststoffs enthält (s. Bild 2-4). Je nach Temperatur und relativer Feuchte können die Zwischenräume mehr oder weniger Wasser enthalten und dementsprechend ihren Abstand ändern. Damit werden nicht nur irreversible Änderungen der Zementsteinstruktur sondern auch reversible Anteile der hygrischen Verformungen erklärt.

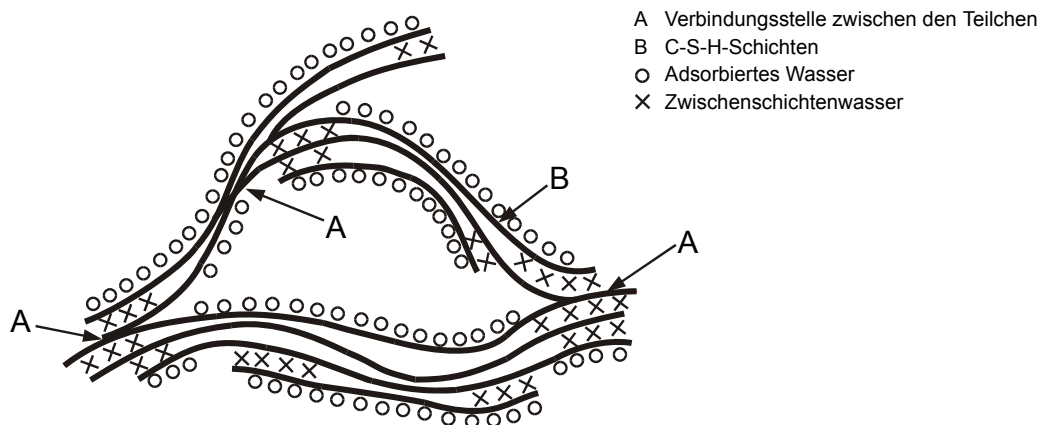


Bild 2-4 Zementsteinmodell nach Feldmann und Sereda [Fel 68]

2.2.4 Zementsteinmodell nach Wittmann und Setzer

2.2.4.1 Münchner Modell

In dem zur Beschreibung der physikalischen Eigenschaften des Zementsteins erarbeiteten „Münchner Modell“ wird der Zementstein als ein sogenanntes Xerogel dargestellt [Set 76, Set 77, Übe 76, Wit 77]. Hiernach bestehen zwischen den feinen Zementsteinteilchen große Bindungskräfte. Zwischen den einzelnen C-S-H-Partikeln des Zementsteins wirken sowohl chemische (primäre) als auch van der Waals-Bindungen (sekundäre) (s. Bild 2-5). Die C-S-H-Partikel sind im trockenen Zustand durch den Einfluss der freien Oberflächenenergie stark komprimiert. Mit ansteigender relativer Luftfeuchtigkeit wird zunehmend Wasser auf den Oberflächen der C-S-H-Partikel adsorbiert. Die Anlagerung der Wassermoleküle führt zu einer Absättigung der freien Bindungen an der Partikeloberfläche und somit zu einer Abnahme der Oberflächenenergie. Infolgedessen expandieren die C-S-H-Partikel proportional zur Energieänderung.

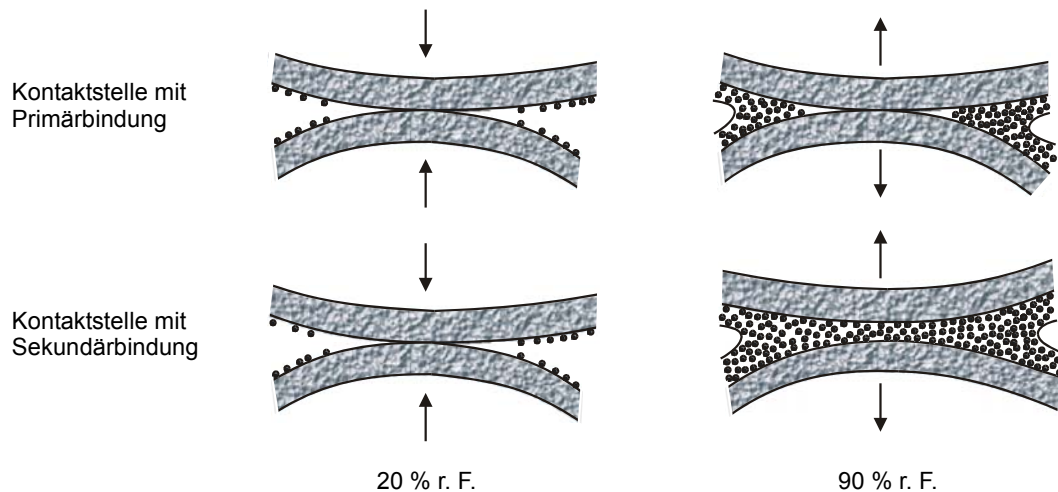


Bild 2-5 Schematische Darstellung von primären und sekundären Kontaktstellen zwischen den Gelteilchen – Bei Primärbindung wird die Kontaktstelle zusammengehalten, bei Sekundärbindung kann die Kontaktstelle bei höherer relativer Feuchte durch den Spaltdruck des Wassers getrennt werden [Wit 77]

Im unteren Feuchtebereich basieren die hygrischen Verformungen auf einer Volumenänderung der C-S-H-Partikel. Hierfür wird ein Bereich zwischen 0 % und 40 % r. F. angegeben. Im oberen Feuchtebereich ab etwa 40 % r. F. wird das Porengefüge durch den Spaltdruck aufgeweitet und die hygrischen Verformungen werden durch die Spaltdruckwirkung des Wassers („disjoining pressure“) dominiert. Der Spaltdruck übersteigt die mit zunehmender Adsorbatmenge schwächer werdenden van der Waals-Bindungen und treibt die einzelnen C-S-H-Partikel auseinander. Gleichzeitig wird die Wirkung chemischer Bindungen zwischen den C-S-H-Partikeln reduziert (s. Bild 2-6).

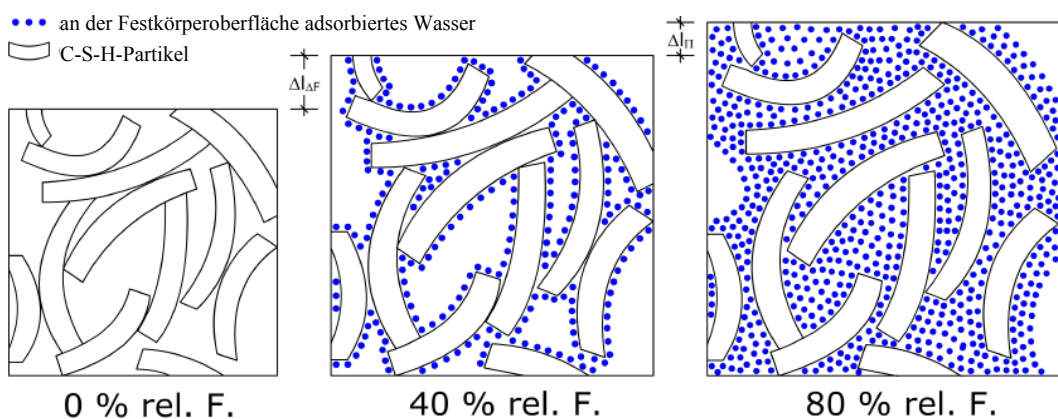


Bild 2-6 Quellverformung des Zementsteins nach dem Münchner Modell [Wit 77]

In Bild 2-7 ist der Zusammenhang zwischen der Gesamtverformung $\Delta l/l$ von Zementstein und der relativen Feuchte sowie der Einfluss der Oberflächenenergie und des

Spaltdrucks veranschaulicht. Der Spaltdruck ruft hierbei eine Längenänderung von $\Delta l_\pi/l$ und die Oberflächenenergie von $\Delta l_0/l$ hervor. Zwischen rd. 100 % r. F. und rd. 40 % r. F. ist die Gesamtverformung die Summe aus diesen beiden Komponenten. Mit abnehmender relativer Luftfeuchte verkürzt sich der Zementstein, verursacht durch den Spaltdruck, um den Betrag $\Delta l_\pi/l$. Unterhalb einer relativen Feuchte von rd. 40 % wird das Schwinden von Zementstein nahezu ausschließlich von der Änderung der Oberflächenenergie ($\Delta l_0/l$) bestimmt.

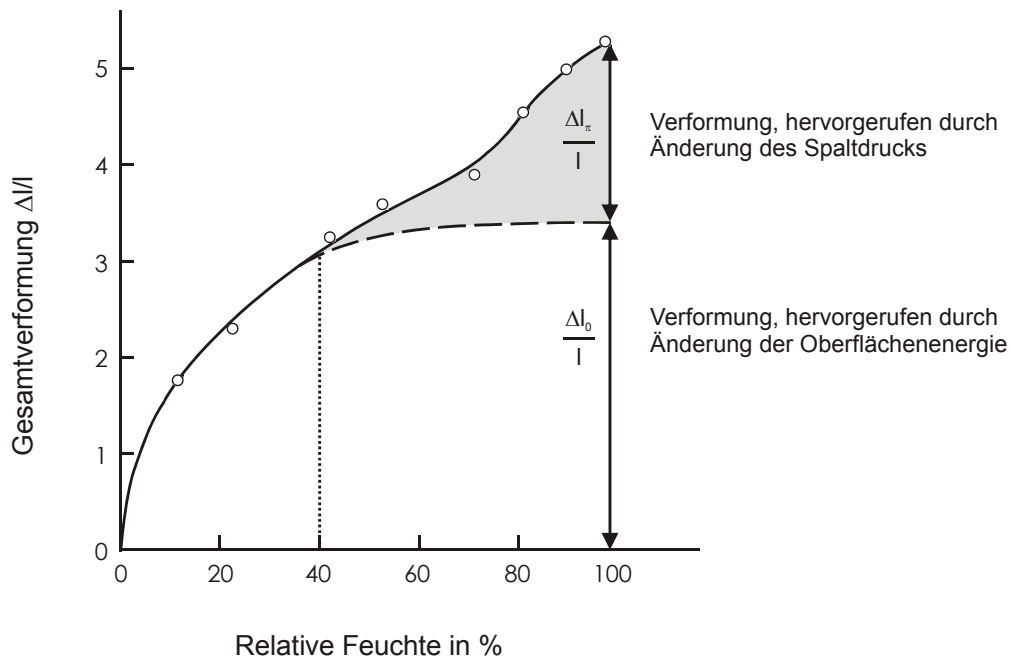


Bild 2-7 Längenänderung von Zementstein in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte [Wit 77] aufbauend auf Versuchsergebnissen aus [Klu 73]

2.2.4.2 Grundlagen der Spaltdrucktheorie

Die heutige Beschreibung der Spaltdruckwirkung des Wasser beruht auf einer von Derjaguin bereits in den 1930er Jahren vorgestellten Theorie, die den Spaltdruck Π in Pa zunächst als Druckdifferenz zwischen einer ungestörten, makroskopischen Phase einer Flüssigkeit (p_0) und einer unter dem Einfluss der Wechselwirkungen nahe beieinander liegender Oberflächen stehenden Zwischenphase (p_1) entsprechend Gleichung 1 in Abhängigkeit vom Abstand h der Oberflächen zueinander definiert.

$$\Pi(h) = p_1 - p_0 \quad \text{Gleichung 1}$$

Der Spaltdruck setzt sich aus drei Komponenten – einem molekularen (dispersiven) Anteil, einem elektrostatischen Anteil und einem Strukturterm – zusammen, die sich in ihren Wechselwirkungsmechanismen unterscheiden:

$$\Pi = \Pi_m + \Pi_e + \Pi_s$$

Gleichung 2

Die einzelnen Komponenten werden im Folgenden kurz erläutert. Als Anziehungskraft wirkende Anteile sind durch ein negatives Vorzeichen (negativer Spaltdruck), abstoßende Terme sind durch ein positives Vorzeichen gekennzeichnet. Eine detaillierte Erörterung ist in [Der 87] und [Chu 00] dargestellt, wo zudem die Übertragung der Theorie auf sphärische Partikel sowie Modelle für poröse Systeme erläutert sind.

Die molekulare (dispersive) Komponente

Die molekulare Komponente Π_m basiert auf der Theorie dispersiver Kräfte und entspricht der elektromagnetischen Dipol-Dipol-Wechselwirkung. Die Wirkung der van der Waals-Kräfte spielt im Bereich sehr geringer Abstände h (wenige Nanometer) gegenüber liegender Oberflächen eine bedeutende Rolle, nimmt aber mit wachsendem Abstand schnell ab. Die Wirkungsstärke der dispersiven Komponente wird durch die Adsorption von Wasser auf den Oberflächen – annähernd in gleichem Maß wie die Oberflächenenergie – deutlich reduziert. In einer wassergefüllten Zementsteinpore mit einem mittleren Abstand der Gelpartikel von $h = 2 \text{ nm}$ wirkt ein Spaltdruck infolge der van der Waals-Kräfte von $\Pi_m = -0,22 \text{ MPa}$. Demgegenüber beträgt der Spaltdruck in einer mit Luft gefüllten Pore etwa $\Pi_m = -0,84 \text{ MPa}$ [Duc 08]. Die Wechselwirkung bei gleichem Abstand im luftgefüllten Porenraum ist somit um ein vielfaches höher als im wassergefüllten Porenraum (Faktor 3,8). Zwischen zwei unterschiedlichen Phasen kann der disperse Anteil des Spaltdrucks ein beliebiges Vorzeichen aufweisen. Bei identischen Körpern, wie im Zementstein, wirkt er stets anziehend, besitzt also ein negatives Vorzeichen.

Die Elektrostatische Komponente

Durch die Oberflächenladung einer Grenzfläche (Oberfläche der C-S-H-Partikel) entsteht im darauf adsorbierten Elektrolyten (Porenlösung) eine mehrere Moleküllagen starke diffuse elektrostatische Doppelschicht (EDL: Electrical Double Layer). Überlagern sich zwei gegenüber liegende Schichten, kommt es bei gleicher Ladung der beiden Grenzflächen zu einem abstoßenden Effekt, der exponentiell mit wachsendem Abstand h abnimmt. Dieser Anteil wird als die elektrostatische Komponente Π_e des Spaltdrucks bezeichnet. In Zementstein wirkt diese Komponente stets abstoßend (positives Vorzeichen). Die elektrostatische Komponente ist von der Ladungsdichte der gelösten Ionen an der Zementsteinoberfläche abhängig und wird insbesondere durch den pH-Wert der Porenlösung beeinflusst.

Die Struktur-Komponente

Die Dicke der unter dem Einfluss der strukturellen Komponente Π_s stehende Zwischenschicht kann in Abhängigkeit von den Eigenschaften von Substrat (Zementstein) und Adsorbat (Porenlösung) im Bereich weniger Moleküllagen bis einige Nanometer liegen.

In diesem Bereich weisen die Wassermoleküle der Porenlösung aufgrund der Oberflächenwechselwirkung mit dem Zementstein von denen der Volumenphase erheblich differierende Eigenschaften auf (Dichte, Orientierung, Energie etc.). Ähnlich wie bei der elektrostatischen Komponente führt auch hier (im Falle des Systems Zementgel/ Wasser) die Überschneidung zweier gegenüberliegender Filme zu einem abstoßenden Effekt.

Kapillarspannungen

Neben der Oberflächenenergie und dem Spaltdruck gehören die Kapillarspannungen zu den am häufigsten genannten und diskutierten Mechanismen bei der Erklärung der Schwinddehnungen des Zementsteins. Insbesondere bei der Modellierung der hygri-schen Verformungen werden sie angewendet [Ben 95]. Wird die relative Luftfeuchtigkeit der Umgebung, ausgehend von annähernd 100 % r. F., gesenkt, werden zunächst die groben Poren geleert, mit sinkender Feuchte dann zunehmend die Poren geringerer Größe. In Poren mit Durchmessern etwa kleiner 50 nm entstehen schließlich aufgrund der Oberflächenspannung des Wassers gekrümmte Menisken an der Grenzfläche zwischen Flüssigphase und Dampfphase. Infolgedessen wird der Druck im verbliebenen Kondensat reduziert, um einen (mechanischen) Gleichgewichtszustand zu erreichen, welcher für einen sphärischen Meniskus durch die Young-Laplace-Gleichung beschrieben wird:

$$p_c = p_v - p_l = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos(\vartheta)}{r_m} \quad \text{Gleichung 3}$$

Der Kapillardruck p_c (N/m²) ist hierbei die Differenz aus dem Druck in der Dampfphase p_v („vapour“) und dem Druck in der Flüssigphase p_l („liquid“) in N/m². γ ist die Oberflächenspannung des Wassers in N/m und r_m der mittlere Krümmungsradius des Meniskus in m.

Das negative Vorzeichen des Kapillardrucks bedeutet dabei, dass im Wasser Zugspannungen herrschen (Unterdruck). Der Krümmungsradius des Meniskus wird mit sinkender Luftfeuchtigkeit kleiner. Dies hat eine Zunahme der Kapillarspannung zur Folge. Unterschreitet schließlich der Krümmungsradius bei einer bestimmten Feuchtigkeit den kritischen Radius der Kapillare, wird das Kondensat schlagartig desorbiert. Die Pore wird entleert (es bleibt lediglich ein adsorbierter Film auf der Oberfläche zurück) und die Kapillarspannungen in der betrachteten Pore verschwinden.

Die Spaltdrucktheorie nach Derjaguin und Churaev geht von vollständig gefüllten Poren aus [Der 87, Chu 00]. Durch die Desorption von Zementstein werden die Poren jedoch stetig entleert. Dies ist verbunden mit der Meniskusbildung der Wasserfilme. Ferraris und Wittmann [Fer 87] berücksichtigten die auftretenden Kapillarspannungen, indem sie dem Spaltdruck (s. Gleichung 2) eine weitere anziehend wirkenden Komponente (negatives Vorzeichen) Π_c hinzufügten. Damit berechnet sich der Spaltdruck zu:

$$\Pi = \Pi_m + \Pi_e + \Pi_s + \Pi_c$$

Gleichung 4

Da die Nanoporen im Zementstein im Wesentlichen mit strukturiertem Wasser gefüllt sind und die Porenlösung deshalb keinen Meniskus bilden kann, ist der Kapillardruck nach Wittmann in diesem Bereich vernachlässigbar und spielt nur im oberen Feuchtebereich eine – allerdings dem Spaltdruck untergeordnete – Rolle. Beltzung und Wittmann gehen davon aus, dass die Kapillarspannungen entweder in ihrer Größe überschätzt werden oder nicht in der Form wirken, wie sie bislang angenommen wird [Bel 05].

2.2.5 Das Feststoff-Porenwassersystem des Zementgels (SLGS Modell)

Nach Ergebnissen jüngster Forschungsarbeiten beschreiben die Mechanismen, die nach dem „Münchner Modell“ zu hygrischen Verformungen von Zementstein führen, das Schwinden von Zementstein nicht mehr in vollem Umfang. Vielmehr wird in Setzer et al. [Set 06, Set 06a] davon ausgegangen, dass während der Hydratation zunächst ein stabiles Gefüge entsteht, in dem die Calciumsilikathydratphasen so lange wachsen, bis ihr Abstand gerade so klein wird, dass ein energetisches Minimum erreicht wird und der Spaltdruck verschwindet. Da dem Porenwasser eine stabilisierende Funktion zukommt, handelt es sich beim C-S-H-Gerüst des Zementsteins weniger um ein Xerogel, als vielmehr um ein Hydrogel. Mit der ersten Desorption von Wasser aus der Struktur und der zunehmenden Entleerung der Poren nehmen die nur im Porenwasser wirkenden abstoßenden Anteile ab, während der Einfluss der molekularen (dispersiven) Komponente im luftgefüllten Raum deutlich höher als in der zuvor vollständig mit Wasser gefüllten Pore ist. Dies führt zu einer Reduzierung des Porenvolumens und einer messbaren Schwindverformung, die proportional zum Masseverlust ist. Werden schließlich im Bereich niedriger relativer Luftfeuchtigkeit auch noch die letzten molekularen Wasserschichten desorbiert, gewinnt der Einfluss der Oberflächenenergieänderung zunehmend an Bedeutung. Allerdings äußert sich diese Energiezunahme nicht in einer wie im Münchner Modell dargestellten Kontraktion der Partikel, sondern in einer Erhöhung der molekularen Komponente des Spaltdrucks, wodurch das Porenvolumen weiter reduziert wird.

2.2.6 Modellvorstellungen nach Jennings

In jüngeren Untersuchungen griffen Jennings und Tennis [Jen 00, Jen 04, Ten 00] die vorgenannten Modelle auf und stellten ein Kolloid-Modell vor. Hiernach wurde, basierend auf Sorptionsmessungen mit Wasserdampf und Stickstoff, die Zementsteinstruktur als Gel dargestellt, in dem das Calcium-Silikat-Hydrat in zwei Typen mit verschiedenen Dichten vorliegt. Es werden hierbei LD C-S-H mit geringer Dichte und HD C-S-H mit hoher Dichte unterschieden. Das LD C-S-H bildet sich bereits in den ersten Stunden der Hydratation, das HD C-S-H im späteren Verlauf der Hydratation. Die Modellvorstellungen basieren darauf, dass die innere Oberfläche des Gels für Wasserdampf zugänglich ist, wohingegen Stickstoff nur Zugang zu größeren Poren zwischen den LD C-S-H Partikeln und teilweise innerhalb des LD C-S-H hat (s. Bild 2-8).

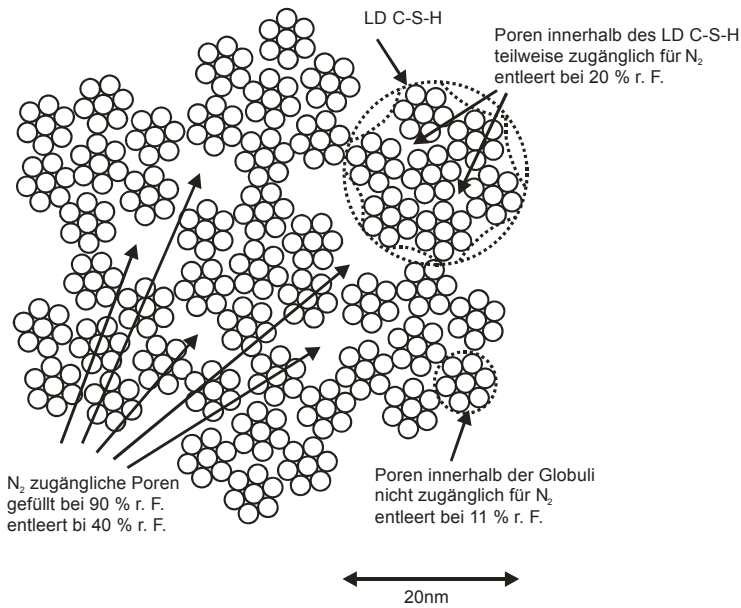


Bild 2-8 Schematische Darstellung des LD C-S-H in Anlehnung an [Jen 00]

2.2.7 Zementsteinstruktur nach Stark und Möser

Nach Stark und Möser weist Zementstein aufgrund seiner großen Oberfläche eine stark fehlgeordnete, nanokristalline Struktur, die sich allerdings röntgenamorph verhält [Sta 01a, Sta 03]. Die Festigkeit des Zementsteins ist auf das Aneinanderwachsen und die millionenfache Verzahnung der einzelnen Fasern (Reißverschluss-Prinzip) zurückzuführen. Die Abstände zwischen den Spitzen der C-S-H-Phasen sind kleiner als 1 nm und werden folglich den Mikroporen zugeordnet. Die Hohlräume zwischen den einzelnen C-S-H-Phasen und auch den anderen Hydratphasen weisen Durchmesser zwischen 1 nm und 30 nm auf und werden den Mesogelporen zugeordnet.

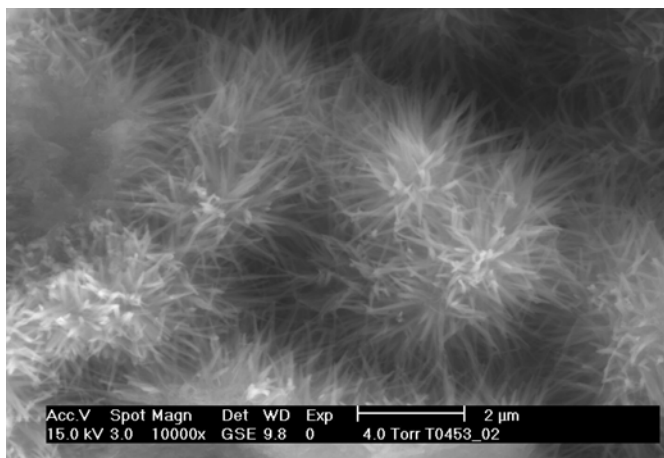


Bild 2-9 Bildung von spitznadeligen C-S-H-Phasen bei der Hydratation von C_3S [Ric 04]

2.3 Methoden der Schwindreduzierung

2.3.1 Allgemeines

Die Ausführungen in Abschnitt 2.1 haben gezeigt, dass insbesondere das Kapillarschwinden sowie das autogene und das Trocknungsschwinden von Beton nachteilige Auswirkungen auf das Gefüge und damit auf die Gebrauchseigenschaften haben kann, während das Carbonatisierungsschwinden im Allgemeinen von untergeordneter Bedeutung ist. Das Kapillarschwinden kann durch geeignete Nachbehandlungsmaßnahmen gezielt minimiert werden (s. Abschnitt 2.1.2).

Die Reduzierung des autogenen Schwindens und des Trocknungsschwindens stellt für Betontechnologen und Bauausführende jedoch eine große Herausforderung dar. Grube [Gru 91, Gru 03] fasste in seinen Arbeiten die baupraktische Bedeutung des Schwindens zusammen und gelangte zu den nachfolgenden Erkenntnissen:

- Das Schwindmaß von Beton erhöht sich im Wesentlichen mit zunehmendem Zementleimgehalt und abnehmender relativer Umgebungsfeuchte.
- Geringere Bauteilabmessungen führen zu einer Vergrößerung des Schwindmaßes, da die Bauteile schneller austrocknen und früher die Ausgleichsfeuchte erreichen.
- Das Alter des Betons bei Austrocknungsbeginn ist für das Gesamtschwinden des Betons von geringem Einfluss, wenn das im Gesamtschwindmaß enthaltene autogene Schwinden berücksichtigt wird.
- Bei konstantem Zementleimgehalt sind die Gesamtschwindmaße von Betonen mit unterschiedlichen Wasserzementwerten gleich. Lediglich die Anteile des autogenen Schwindens und des Trocknungsschwindens sind unterschiedlich.

Diese Schlussfolgerungen zeigen, dass das Schwinden nur in begrenztem Maße durch Planung und betontechnologische Maßnahmen reduziert werden kann.

In jüngster Zeit werden im Betonbau von Architekten und Planern zunehmend schlanke, filigrane Bauteile sowie bei der Erneuerung von Gebäuden die Erstellung neuer Betonelemente auf bereits vorhandener Bausubstanz vorgesehen. Hierzu werden in zunehmendem Maße Hochleistungsbeton wie z. B. selbstverdichtender Beton oder hoch- und ultrahochfester Beton verwendet. Diese Betone enthalten im Allgemeinen einen höheren Bindemittelanteil als Normalbetone. In Verbindung mit der Verringerung von Bauteilabmessungen kann dies zu einem erhöhten Schwindmaß und daraus folgend zu höheren Eigen- und Zwangsspannungen führen. Dem muss durch Anordnung von Fugen und/oder Rissbreiten beschränkender Bewehrung Rechnung getragen werden. Aus architektonischer Sicht sowie auch meist aus wirtschaftlichen Gründen kann es deshalb erforderlich sein, Fugenabstände zu vergrößern und Rissbreiten beschränkende Bewehrung zu minimieren, indem das Schwinden durch den Einsatz von Zusatzstoffen oder Zusatzmitteln reduziert wird. In den folgenden Abschnitten sind Möglichkeiten darge-

stellt, wie das Schwinden von Beton durch den Einsatz von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln reduziert werden kann.

2.3.2 Quellzemente

Schon seit fast einem Jahrhundert wird versucht, das Schwinden von Beton und seine Neigung zur Rissbildung durch Verwendung anorganischer Zusatzstoffe zu vermindern. Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung von Zementen mit weiteren Hauptbestandteilen, die inert oder wenig reaktiv sind. Dem Zement können aber auch quellende Bestandteile zugesetzt werden. Diese Zemente werden als Quellzemente bezeichnet. Das erste Patent eines Quellzements, das ein „Verfahren zur Herstellung eines schwindfreien Betons“ beschreibt, geht auf Guttman [Gut 20] aus dem Jahr 1920 zurück. Dieses Verfahren beruht auf einer Volumenvergrößerung des Betons durch die Zugabe von Gips und der Reaktion des Sulfats mit den aluminathaltigen Phasen des Zements zu Ettringit.

Nach Chartschenko [Cha 94] sind Quellzemente anorganische Bindemittel, die eine zeitlich und räumlich gesteuerte Volumenzunahme aufweisen und dem Schwindvorgang durch einen konstanten Quelleffekt entgegenwirken.

Die Reduzierung des Schwindens durch Quellzemente beruht darauf, dass der Zementstein in der Anfangsphase der Hydratation eine starke Volumenvergrößerung aufweist. Nach vollständiger Reaktion oder Beendigung der Wasserzufuhr schwinden Quellzemente im Allgemeinen bei anschließender Austrocknung ähnlich wie Zementstein ohne Quellkomponenten. Insgesamt kann nach abgeschlossener Verformung eine Volumenvergrößerung verbleiben. Bei Zementstein ohne Quellkomponente bauen sich bei Behinderung der Verformungen Zugspannungen auf, die zu Rissen führen können. Im Gegensatz dazu bauen sich bei Behinderung im Zementstein mit Quellkomponente zunächst Druckspannungen auf, die vom Quellmaß im Anfangsstadium des Erhärtungsprozesses abhängig sind und während des Schwindens mehr oder weniger vollständig abgebaut werden.

Die Verwendung verschiedener Quellkomponenten führt unter Volumenzunahme zur Bildung unterschiedlicher Reaktionsprodukte im Zementstein, die wie folgt klassifiziert werden können:

- Ettringitbildung durch Sulfatzugabe
- Hydroxidbildung durch Calcium- und/oder Magnesiumoxidzugabe
- Wasserstoffgasblasenbildung durch Zugabe von Aluminiumpulver

Die Bildung von Ettringit beruht bei Quellzementen auf der Reaktion von Aluminium-, Calcium- und Sulfationen. Hierbei ist eine gleichmäßige und stöchiometrisch exakte Dosierung wichtig, um die Reaktion in die Frühphase der Zementerhärtung zu verlagern und eine vollständige und schnelle Dehnung zu erreichen. Dabei muss der Quelleffekt zeitlich so gesteuert werden, dass er weder im plastischen Beton noch im bereits erhärteten Beton eintritt. Ein ausreichendes Wasserangebot ist für die Reaktion Voraussetzung.

Durch die Zugabe von Calcium- bzw. Magnesiumoxid zum Zement oder Beton ist eine Volumenzunahme unter Bildung von Calciumhydroxid bzw. Magnesiumhydroxid (Bruit) möglich. Hierbei reagieren die Oxide mit dem Wasser im Zementleim zu Calcium- bzw. Magnesiumhydroxid, die ein größeres Volumen aufweisen als deren Ausgangsstoffe. Ein ausreichendes Wasserangebot ist auch hier Voraussetzung für das Quellen.

Die dritte Möglichkeit, ein Quellen des Zementleims/-steins zu erreichen, besteht in der Zugabe von Aluminiumpulver zum Zement. Aluminium reagiert mit dem bei der Hydratation des Zements entstehenden Calciumhydroxid unter Bildung von Wasserstoff zu Aluminiumhydroxid. Die entstehenden Wasserstoffporen dehnen sich im Zementleim aus und führen zu einer Volumenvergrößerung des erhärtenden Zementsteins.

2.3.3 Schwindreduzierung durch innere Nachbehandlung

Neben der Verwendung quellender Komponenten besteht eine weitere Möglichkeit der Schwindreduzierung darin, eine Austrocknung des Zementsteins zu verlangsamen. Insbesondere bei hochfesten Betonen, die in großem Umfang autogen schwinden, wird diese Methode angewendet. Das Prinzip beruht auf der Verwendung wasserspeichernder Gesteinskörnung oder Zusatzstoffe im Beton, um die innere Austrocknung und somit die autogenen Verformungen zu reduzieren [Lur 03a]. Dies wird z. B. durch wassergesättigte leichte Gesteinskörnung [Rei 02, Web 96] oder durch superabsorbierende Polymere (SAP) [Jen 01] erreicht.

Insbesondere die Verwendung von SAP wird derzeit als effektives Mittel angesehen, um das autogene Schwinden und die Rissbildung von hochfesten und ultrahochfesten Betonen (UHPC) zu reduzieren [Dud 08, Jen 02, Mec 06].

2.4 Organische schwindreduzierende Zusatzmittel

2.4.1 Allgemeines

Schwindreduzierende Zusatzmittel (engl. Shrinkage Reducing Admixture – **SRA**) wurden Anfang der 1980er-Jahre in Japan erstmals entwickelt und hinsichtlich ihrer Wirkung untersucht. Bei den in Schwindreduzieren eingesetzten Substanzen handelt es sich i. d. R. um kurz- und langkettige Kohlenwasserstoffe. Es werden Polyoxyalkylen- oder Polyoxyalkylenether-Verbindungen zur Herstellung von Schwindreduzieren verwendet. Es können aber auch alkylveretherte und alkylveresterte Verbindungen eingesetzt werden. Schwindreduzierer gehören zur Gruppe der nichtionischen Tenside und sind durch funktionelle Hydroxyl- und Methylgruppen gekennzeichnet, die sich an den Enden der Ketten- oder Seitenketten der Moleküle befinden.

Die hydrophile Gruppe nichtionischer Tenside ist in Wasser hydratisiert und bewirkt durch die ausgeprägte Anziehungskraft zu Wasser die Tensid-Löslichkeit. Der Wirkungsmechanismus von nichtionischen Tensiden bei Adsorptionsvorgängen ist auf hydrophobe Wechselwirkungen zurückzuführen. Die Anziehungskräfte zwischen den hydrophoben Kohlenwasserstoff-Ketten und den sie umgebenden Wassermolekülen sind

wesentlich geringer als zwischen den Wassermolekülen untereinander. Die starke Attraktion der Wasserdipole zueinander wird durch die hydrophobe Gruppe gestört und bewirkt ein Herausdrängen der Tensid-Moleküle aus dem Innern der wässrigen Phase. Dadurch wird die Oberflächenspannung von Wasser herabgesetzt. Mit steigender Länge des hydrophoben Restes wird dieser Effekt verstärkt. Außerdem werden in unmittelbarer Nähe der Kohlenwasserstoff-Kette die thermodynamischen Zustandsgrößen der wässrigen Lösung und die Wasserstruktur verändert. [Böh 02, Sch 72]

Nichtionische Tenside haben die Eigenschaft, bei einer bestimmten Konzentration in wässriger Lösung zu agglomerieren. Diese Konzentration wird als kritische Mizellbildungskonzentration bezeichnet. Bei niedrigen Konzentrationen nehmen die Mizellen i. d. R. Kugelgestalt an. Die hydrophoben Gruppen sind zum Innern der Kugel und die hydrophilen Gruppen zum Wasser orientiert. Insofern besteht eine Mizelle aus einem Kohlenwasserstoff-Kern und einer hydrophilen Schale, die den Kern von der wässrigen Phase abschirmt. Bei größeren Konzentrationen können die Mizellen in Plättchen oder Stäbchen übergehen, wobei das Bauprinzip erhalten bleibt [Sch 72]. Oberhalb der kritischen Mizellbildungskonzentration verändert sich die Oberflächenspannung nicht mehr.

2.4.2 Einfluss auf die Oberflächenspannung der Porenlösung

Es wird davon ausgegangen, dass die schwindreduzierende Wirkung organischer Zusatzmittel im Wesentlichen auf die Verringerung der Oberflächenspannung der Porenlösung zurückzuführen ist [Sat 83]. Der Einfluss schwindreduzierender Zusatzmittel auf die Oberflächenspannung des Zugabewassers und der Porenlösung wurde von einigen Forschern [Ai 97, Ben 01a, Oha 88, Pea 05, Ron 05, Sat 83, Sug 98] untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst.

Tabelle 2-1 Literaturangaben zur Oberflächenspannung von Zugabewasser-SRA-Gemischen und Porenlösung aus Zementleim und -stein mit SRA

Literatur- stelle	Zeitpunkt der Prüfung	Dosierung	Oberflächenspannung		
			Referenz- probe ohne SRA	Probe mit SRA	Reduzierung relativ zur Referenz- probe
	h	M.-% v. w	mN/m		%
1	2	3	4	5	6
[Sat 83]	< 24	5,0 ²⁾	72,5 ¹⁾	44,7	38
		10,0 ²⁾		42,2	42
		20,0 ²⁾		40,0	45
[Oha 88]	2	2,9 ²⁾	54,3	30,0	45
		5,7 ²⁾		27,5	49
[Ai 97]	0 ³⁾	~ 5	72	~ 38	47
[Ben 01a]		6,0	76,5	32,5	48
[Pea 05]		1,0	72,5 ¹⁾	50,5	30
		10,0		33,5	54
[Ron 05]		~ 5,0	72,5 ¹⁾	~ 40	45
[Sug 98]		~ 0,6	72,5 ¹⁾	41,6	43
		~ 0,4		40,0	45

- 1) Es wurde die Oberflächenspannung von Wasser bei 20 °C angenommen, da keine Literaturdaten vorlagen
- 2) da die Literaturstelle keine eindeutigen Angaben macht, wurde davon ausgegangen, dass sich die Dosiermenge der SRA auf die Zementmenge bezieht und eine entsprechende Dosierung bezogen auf das Zugabewasser berechnet
- 3) direkt nach der Herstellung des Zugabewasser-SRA-Gemisches

Die Ergebnisse belegen, dass Schwindreduzierer die Oberflächenspannung des Zugabewassers und der Porenlösung im jungen Alter (1 Tag) um 54 % bis 30 % senken. Die Größe der Absenkung war dabei von der Art und der Dosiermenge der SRA abhängig, wobei zu den Wirkstoffen keine Angaben vorlagen. Sofern in der Literatur keine Angaben zur Oberflächenspannung der Referenzprobe ohne SRA vorlagen, wurde die Oberflächenspannung von Wasser (72,5 mN/m) bei 20 °C angenommen. Eigene Untersuchungen haben bestätigt, dass die Oberflächenspannung der Porenlösung von Zementstein der von Wasser bei rd. 20 °C entspricht.

Der Nachweis, dass die Oberflächenspannung der Porenlösung im Zementstein bzw. Beton dauerhaft über mehrere Wochen, Monate oder Jahre durch Schwindreduzierer herabgesetzt wurde und somit für eine dauerhafte Schwindreduzierung verantwortlich war, wurde bislang nicht erbracht. Darüber hinaus fehlen Ergebnisse, bei denen die

Oberflächenspannung der Porenlösung mit der entsprechenden tatsächlich ermittelten Schwindverformung über längere Zeiträume korreliert wurde.

2.4.3 Einfluss auf die Zementleim-, Frischmörtel- und Frischbetoneigenschaften

Aus einer Reihe von Veröffentlichungen geht hervor, dass Schwindreduzierer keinen signifikanten Einfluss auf die Frischbetoneigenschaften haben [Buf 00, Col 06, Nma 98]. Teilweise führten SRA zu geringfügig größeren Ausbreitmaßen bei Mörteln und Betonen [Lüc 01, Vid 05, Wit 99]. In [Saw 85, Sch 99, Sug 87] verringerte sich der Luftgehalt von Frischmörteln und Zementleimen bei Verwendung von Schwindreduzierern in geringem Maße. Dies wurde auf eine entschäumende Wirkung der Schwindreduzierer zurückgeführt. Teilweise wurden durch Schwindreduzierer aber auch größere Luftgehalte hervorgerufen als in entsprechenden Referenzproben ohne SRA [Wit 99]. Die Kombination von schwindreduzierenden Zusatzmitteln mit luftporenbildenden Zusatzmitteln führte teilweise zu einem deutlichen Rückgang des Luftgehaltes im Frischbeton und damit zu einer signifikanten Verschlechterungen des Widerstandes gegenüber einem Frostangriff [Ber 03, Cop 01, Fuj 94, Sch 99]. Der Einfluss schwindreduzierender Zusatzmittel auf die Frischbetoneigenschaften ist nach dem derzeitigen Stand der Kenntnisse als gering zu beurteilen.

2.4.4 Einfluss von SRA auf das Schwinden von Zementstein, Mörtel und Beton

2.4.4.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt wird zusammengefasst, in welchem Maße Schwindreduzierer das Kapillarschwinden, das autogene und das Gesamtsschwinden von Zementstein, Mörtel und Beton beeinflussen können. Bei der Auswertung der vorhandenen Literaturdaten wird deutlich, dass die schwindreduzierende Wirkung von SRA in Beton wesentlich umfangreicher untersucht wurde als in Zementstein und Mörtel. Jedoch sind systematische Untersuchungen zum Einfluss von SRA auf das Schwinden von Zementstein und Mörtel von besonderem Interesse, da hauptsächlich der Zementstein das Schwinden von Beton bestimmt.

In der englischsprachigen Literatur wird häufig der Begriff „drying shrinkage“ als Synonyme für das Schwinden von Beton während der Austrocknung an Luft oder in Konstantklima verwendet. Dieses Schwinden beinhaltet in der Regel immer einen Teil des autogenen Schwindens, wenn die Messungen rd. 24 Stunden nach der Herstellungen beginnen und wird deshalb im Folgenden als Gesamtschwinden bezeichnet.

2.4.4.2 Zementstein und Mörtel

Bröker und Simatupang [Brö 76] berichteten bereits 1976 von Untersuchungen, bei denen Polyethylenglykol (PEG) als Zusatzmittel in Zementstein und Mörtel eingesetzt wurde, um den Einfluss auf das Gesamtschwinden zu untersuchen. In den Untersuchungen wurde der Einfluss der PEG-Kettenlänge bei gleicher Anzahl funktioneller OH-Gruppen auf das Schwinden untersucht. Das Schwinden von Zementstein nahm mit zu-

nehmender PEG-Menge ab. Dabei führten gleiche PEG-Mengen bei unterschiedlichen Molekulargewichten zu gleichen Schwindreduzierungen. Mit 5 M.-% PEG bezogen auf das Zugabewasser (5 M.-% v. w) betrug die Schwindreduzierung von Zementstein zwischen 31 % und 33 % und bei Mörtel zwischen 25 % und 28 %, bezogen auf die jeweilige Referenzprobe ohne PEG. Bei rd. 10 M.-% v. w PEG zeigte sich im Alter von 28 Tagen eine maximale Schwindreduzierung von rd. 92 %. Größere Dosiermengen führten zu keiner weiteren Reduzierung des Schwindens.

In [Sat 83, Sho 90] wurde die Wirkung auf das Schwinden von Zementstein bei unterschiedlicher relativer Luftfeuchte untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Wirkung der SRA signifikant von der relativen Umgebungsfeuchte (r. F.) beeinflusst wurde. Mit abnehmender Umgebungsfeuchte bis 45 % r. F. nahm die schwindreduzierende Wirkung zu. Unterhalb davon veränderte sich die Schwindreduzierung nicht mehr. Bei einer relativen Umgebungsfeuchte, die unserem Normalklima mit 20 °C und 65 % r. F. entspricht, wurden mit steigender Dosiermenge an SRA das Schwinden um rd. 30 % bis rd. 50 % reduziert. Sato et al. [Sat 83] schlussfolgerten aus den Ergebnissen, dass eine herabgesetzte Oberflächenspannung des Kapillarporenwassers zu einer Abnahme der inneren Spannungen im Zementsteingefüge führt und somit das Gesamtschwinden von Zementstein reduziert wird. Bis heute wird diese These häufig zitiert und in der Fachliteratur als maßgebender Wirkungsmechanismus für SRA vertreten.

Tazawa und Miyazawa [Taz 95] führten Untersuchungen an Zementstein unter konservierenden Lagerungsbedingungen durch und bestimmten das autogene Schwinden. Durch die Verwendung von SRA wurde das Schwinden um rd. 50 %, bezogen auf Referenzproben ohne Schwindreduzierer, verringert.

Die dargestellten Ergebnisse belegen, dass das Schwinden von Zementstein durch schwindreduzierende Zusatzmittel abgemindert wird. Differenzierte Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit und Wirkung verschiedener Wirkstoffgruppen in Zementstein mit unterschiedlichen Zementarten liegen jedoch bislang nicht vor.

2.4.4.3 Beton

Das Interesse internationaler Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der schwindreduzierenden Zusatzmittel lag in der Vergangenheit vermehrt auf der Untersuchung der Wirkung von SRA auf das Schwinden von Beton. Die Versuche waren meist sehr praxisorientiert angelegt. So wurden z. B. Zusatzmittel mit unbekannter Zusammensetzung (meist handelsübliche Produkte) in verschiedenen Betonen und bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen untersucht, um die Wirksamkeit zu prüfen. Variierende Betonzusammensetzungen, wie z. B. verschiedene Wasserzementwerte oder unterschiedliche Zementarten erschweren eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander, so dass generelle Aussagen zu Wirkmechanismen nur bedingt möglich sind.

Im Jahr 1983 stellten Tomita et al. [Tom 83] erstmals Ergebnisse vor, in denen Betone mit SRA untersucht wurden. Dabei konnte das Schwinden um rd. 30 % bis 40 % im Alter von einem Jahr reduziert werden. Es zeigte sich, dass die Schwindreduzierung mit

zunehmendem Betonalter und steigendem Wasserzementwert abnahm. In den darauf folgenden Jahren bis 1991 wurden vor allem in Japan umfangreiche Untersuchungen zur Wirkung von SRA in Beton aber auch in Zementstein und Mörtel durchgeführt und veröffentlicht. Ab etwa Anfang der 1990er-Jahre wurden auch zunehmend Forschungsarbeiten außerhalb Japans auf dem Gebiet der Schwindreduzierer vorgestellt.

In guter Übereinstimmung zeigten die Untersuchungen, dass die Wirkung der schwindreduzierenden Zusatzmittel von einer Reihe von Faktoren beeinflusst wird. So sinkt die schwindreduzierende Wirkung der SRA mit:

- zunehmendem Betonalter, [Bal 96, Ben 01, Ber 97, Ber 98, Buf 00, Dso 00, Ebe 06, Fol 97, Sha 92, Tom 83, Vid 05]
- abnehmender Dosiermenge, [Buf 00, Dso 00, Eng 97, Mal 05, Mal 06, Ron 05, Saw 85, Sha 92, Sha 98, Sug 87, Tom 83, Wei 98, Wit 99]
- zunehmenden Wasserzementwert. [Bal 96, Ber 98, Sug 87]

Zusätzlich wurde die Wirkung der SRA in normalfestem und in hochfestem Beton von

- dem Leimgehalt, [Ber 98, Ebe 06a, Rib 03, Vid 05]
- der Zementart, [Bal 96]
- den Zusatzstoffen, [Alm 04, Fol 97, Oga 95, Oga 93, Sub 02]
- der Nachbehandlung sowie [Bal 96, Ber 98, Col 06, Sei 01]
- der chemischen Zusammensetzung des Schwindreduzierers [Get 03, Nak 03, Sug 98]

beeinflusst.

Das Schwinden wurde gegenüber Referenzproben ohne Schwindreduzierer um max. 83 % nach 28 Tagen [Ber 98] bzw. um rd. 11 % nach einem halben Jahr [Rib 03] vermindert. Unter Berücksichtigung aller vorliegenden Literaturdaten wurde das Gesamtschwinden von Normalbetonen im Alter von 28 Tagen in grober Näherung um rd. 40 % bis rd. 50 % reduziert.

Einen großen Anteil am Gesamtschwinden hochfester Betone hat das autogene Schwinden. Der Einfluss von SRA auf das autogene Schwinden wurde in [Ben 01a, Get 03, Nak 03, Nog 05, Oga 95, Ron 05, Sha 00, Sub 02, Taz 95, Wei 99] untersucht.

In nahezu allen genannten Untersuchungen, bei denen Schwindreduzierer zusätzlich zu einem Fließmittel dosiert wurde, betrug die schwindreduzierende Wirkung bis zu rd. 50 %. Abweichend hiervon wurde in [Nak 03] mit einem Polycarboxylatether (PCE) mit funktionellen Schwindreduzierer-Gruppen, das als schwindreduzierendes Fließmittel verwendet wurde, Schwindreduzierungen von rd. 10 % bis 14 % erreicht. In [Oga 95] betrugen die Schwindreduzierungen ebenfalls rd. 10 %.

In [Get 03] wurde ein stetiges Quellen von konserviert gelagerten Betonen mit SRA festgestellt. Dies entsprach einer Schwindreduzierung von über 100 % gegenüber den jeweiligen Referenzproben ohne SRA.

Bentz et al. [Ben 01a] führten das durch SRA verminderte autogene Schwinden auf eine durch die SRA hervorgerufene höhere innere relative Feuchte im Inneren des Zementsteins zurück.

2.4.5 Druckfestigkeit

Neben dem Schwinden von Zementstein und Beton wurde auch der Einfluss schwindreduzierender Zusatzmittel auf die Druckfestigkeit untersucht. In den meisten Fällen wiesen Beton mit SRA geringere Druckfestigkeiten auf als Betone ohne SRA. Die Angaben in der Literatur darüber variieren allerdings sehr stark (s. Tabelle 2-2) und sind teilweise widersprüchlich.

Tabelle 2-2 Einfluss von SRA auf die Betondruckfestigkeit

Betonalter in d	Einfluss auf die Beton- druckfestigkeit	Literaturstelle
1	2	3
1 bis 7	Abnahme um 20 % bis 40 %	[Ber 01, Fol 97]
	Abnahme um bis zu 62 %	[Sha 92]
28	kein Einfluss	[Dso 00, Mor 03, Nak 03, Saw 85, Sug 98, Wei 00]
	Abnahme um bis zu 30 %	[Alm 04, Ber 03, Ber 01, Bro 97, Cop 01, Eng 97, Fol 97, Mor 01, Rib 03, Ron 05, Sha 92, Sch 07, Wei 99, Wei 00, Wit 99]
	Abnahme um bis zu 50 %	[Sub 02]
	Zunahme um bis zu 32 %	[Bae 02, Buf 00, Sch 99]

Diese sehr widersprüchlichen Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Einfluss von Schwindreduzieren auf die Betondruckfestigkeit komplex und von einer Vielzahl von Faktoren abhängig ist. Genannt seien an dieser Stelle der Einfluss des Wasserzementwerts auf die Wirkung von SRA, wie in [Wei 00] dargestellt, oder der Einsatz unterschiedlicher Wirkstoffsubstanzen [Sho 90]. Die Abnahme der Druckfestigkeit wurde zum Teil mit erhöhten Luftgehalten im Beton begründet [Wit 99] oder auf eine Verzögerung der Hydratation zurückgeführt [Fol 97]. Bentz et al. [Ben 01a] führten die in den Untersuchungen ermittelten erhöhten Druckfestigkeiten von Mörtelzylindern auf eine verbesserte innere Nachbehandlung durch eine erhöhte innere relative Feuchte zurück. Abschließend sind die Ursachen für die häufig ermittelte Abnahme der Druckfestigkeit jedoch nicht geklärt.

2.4.6 Porengefüge

Die Porosität von Zementstein, Mörtel und Beton wurde in [Ai 97, Sha 92, Tan 97, Wit 99] untersucht.

Ai und Young [Ai 97] stellten fest, dass der Kapillarporenanteil von Zementstein im Alter von einem Tag im Vergleich zu Referenzproben geringfügig erhöht war. Im weiteren Verlauf der Hydratation war jedoch kein signifikanter Unterschied zu Referenzproben ohne Schwindreduzierer feststellbar.

In [Wit 99] wurde der Einfluss von Schwindreduzierern auf die Porosität von Mörteln untersucht. Hier wurden sehr geringe Unterschiede zu den entsprechenden Referenzproben festgestellt, die nicht näher erläutert wurden.

Shah et al. [Sha 92] untersuchten die Porenstruktur von Betonen mit SRA und berichteten von geringeren Anteilen an Kapillarporen mit Durchmessern zwischen 50 nm und 10 µm bei gleichzeitig geringerer Gesamtporosität als bei Betonen ohne SRA. In [Tan 97] wurde bei Untersuchungen an ausgelagerten Betonen, die mit SRA hergestellt wurden, im Alter von 10 Jahren mittels Quecksilberintrusionsmessungen keine Veränderung der Porosität im Vergleich zu Referenzproben ermittelt. Gleichwohl wurde durch Untersuchung der BET-Oberfläche festgestellt, dass bei den Betonen, die mit Schwindreduzierer hergestellt wurden, der Anteil an Poren mit Radien kleiner als 7,5 nm zugenommen hatte. Ähnliche Ergebnisse wurden in [Mal 05] berichtet, wonach die BET-Oberfläche durch den Einsatz von SRA vergrößert wurde. Dies deutet auf eine Verfeinerung des Gefüges hin. Hinweise, nach denen SRA möglicherweise eine erhöhte Kapillarporosität hervorrufen, die zu einer signifikanten Abnahme der Betondruckfestigkeit (s. Abschnitt 2.4.5) führen könnte, wurden bei keiner der o. a. Untersuchungen festgestellt. Die in [Sha 92] und [Tan 97] ermittelte Verfeinerung der Porosität würde im Gegenteil eine Zunahme der Druckfestigkeit erwarten lassen.

2.4.7 Hydratation

Messungen der Hydratationswärmeentwicklung von Zement in Anwesenheit von handelsüblichen Schwindreduzierern oder Schwindreduziererwirkstoffen bei einem Wasserzementwert von $w/z = 0,40$ zeigten, dass die Hydratation bei SRA-Gehalten von bis zu 5 M.-% v. z. bis zum Alter von drei bis sieben Tagen geringfügig verzögert wurde [Brö 76, Ebe 06]. Die Gesamthydratationswärmemenge nach sieben Tagen wurde kaum beeinflusst [Ebe 06]. Erst bei weiterer Erhöhung der Zusatzmittelmenge [Brö 76] bzw. die Verwendung zusätzlicher Betonzusatzmittel, wie z. B. Fließmittel [Ebe 06] verzögerte sich die Hydratationswärmeentwicklung deutlich.

In [Ben 01a] wurde der Hydratationsgrad von Zementstein ohne und mit Schwindreduzierer bestimmt. Dabei wurde festgestellt, dass Schwindreduzierer auf die Hydratation von Zement bis zu einem Alter von elf Tagen keinen Einfluss hatten. Auch durch röntgenografische Untersuchungen der Hydratationsprodukte von Zementsteinproben ließen

sich keine Veränderungen durch schwindreduzierende Zusatzmittel feststellen [Ai 97, Lüc 01].

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen zeigten, dass schwindreduzierende Wirkstoffe die morphologischen Eigenschaften des hydratisierenden Zementsteins beeinflussen können [Cer 01, Lüc 01, Mal 06]. Cerulli et al. [Cer 01] berichteten in diesem Zusammenhang von einer starken Ausfällung von Sulfoaluminaten in den ersten Minuten der Hydratation und von morphologischen Veränderungen, die Einfluss auf die Verteilung von Calcium-Silikat-Hydrat mit geringer und hoher Dichte hatten. Dies wurde grundsätzlich durch die Untersuchungen von Lücke [Lüc 01] und Maltese et al. [Mal 06] bestätigt. In [Lüc 01] wurde von einem Film auf den C-S-H-Phasen berichtet, der die Hydratation des Zements partiell unterdrücken und die Bildung von Ettringit an diesen Stellen verhindern soll. In [Mal 06] wurde vermutet, dass die hydrophoben Moleküle, die in den Schwindreduzierern enthalten sind, die Löslichkeit von Salzen in Wasser verringern und somit die Wasserlöslichkeit von Calciumhydroxid reduzieren können.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die Morphologie von Hydratationsprodukten möglicherweise durch den Einsatz schwindreduzierender Zusatzmittel verändert werden kann. Die Fragestellung, durch welche Mechanismen SRA die Hydratation beeinflussen, wurde jedoch noch nicht hinreichend beantwortet.

2.4.8 Dauerhaftigkeitsrelevante Parameter

Betonbauwerke müssen einen ausreichenden Widerstand gegenüber Umwelteinflüssen während ihrer gesamten Nutzungsdauer aufweisen. Schwindreduzierende Zusatzmittel dürfen die Dauerhaftigkeit der damit hergestellten Betone nicht beeinflussen.

Bislang wurde der Einfluss von SRA auf den Frostwiderstand, auf den Eindringwiderstand gegenüber Chlorid, auf den Carbonatisierungswiderstand von Beton und auf die Korrosion von Bewehrungsstahl untersucht.

Der Einfluss schwindreduzierender Zusatzmittel auf den Frostwiderstand wird in der Literatur sehr konträr diskutiert. In [Sug 87] wurde von einer deutlichen Verbesserung des Frostwiderstandes von Beton durch den Einsatz von Schwindreduzierer berichtet. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass der durch die so genannte Frostpumpe kritische Sättigungspunkt später erreicht wurde als bei Betonen ohne schwindreduzierende Zusatzmittel. Yamada et al. [Yam 04] berichteten dagegen von einer deutlichen Verschlechterung des Frostwiderstands durch den Einsatz von SRA. Die Autoren führten dies auf das Zuwachsen der Luftporen mit Hydratphasen zurück, so dass kein ausreichender Expansionsraum für gefrierendes Wasser zur Verfügung stand.

Untersuchungen, bei denen luftporenbildende Zusatzmittel eingesetzt wurden, führten hinsichtlich des Einflusses schwindreduzierender Zusatzmittel auf den Frostwiderstand von LP-Betonen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. In [Bae 02, Ber 03] wurde an Betonen mit LP-Bildner und Schwindreduzierer ein guter Frostwiderstand ermittelt.

Im Gegensatz dazu zeigten Untersuchungen von [Fuj 94, Sch 99, Sug 87] übereinstimmend, dass bei gleichzeitiger Verwendung von SRA und LP-Bildner der Frostwiderstand deutlich abnehmen kann. Die Abnahme wurde dabei auf folgende Ursachen zurückgeführt:

- erhöhte Viskosität des Kapillarporenwassers beim Gefrieren führt zu größeren Kapillardrücken im Inneren des Betons [Fuj 94]
- unzureichender Expansionsraum im Zementsteingefüge für gefrierendes Eis [Sug 87]
- zu geringe Luftgehalte und ungünstige Verteilung der eingeführten Luftporen [Sch 99]

Diese Ergebnisse machen deutlich, dass Schwindreduzierer die üblichen Eigenschaften von LP-Betonen verändern und den Widerstand gegenüber einem Frostangriff herabsetzen können. Um einen ausreichend hohen Luftgehalt im Frischbeton sicherzustellen wurde teilweise die Menge an luftporenbildenden Zusatzmitteln erhöht [Cop 01]. Dennoch wurden auch hierbei höhere Abwitterungen festgestellt als bei entsprechenden Referenzproben.

Eine Beurteilung des Einflusses schwindreduzierender Zusatzmittel auf den Frostwiderstand von Beton anhand der vorhandenen Literaturdaten erwies sich als sehr schwierig. Teilweise wurden die Untersuchungen sehr unsystematisch durchgeführt. Eine abschließende Klärung der Ursache für einen veränderten Frostwiderstand von Betonen mit Schwindreduzierern ist auf Grund der unterschiedlichen Versuchsbedingungen und den Einsatz verschiedener Zusatzmittel in unterschiedlichen Versuchsreihen nicht möglich.

Der Widerstand von Betonen gegenüber dem Eindringen von Chlorid wurde durch Schwindreduzierer um bis zu 25 % erhöht [Ber 97, Fol 97, Wei 00]. Dadurch wurde die Bewehrungsstahlkorrosion bei Chloridangriff in Beton reduziert [Ber 97]. Auch der Widerstand gegenüber eindringendem Kohlendioxid wurde bei Betonen mit SRA im Vergleich zu Referenzbetonen ohne SRA verbessert. Dies belegen Untersuchungen von [Tan 97], bei denen an Betonen mit SRA nach 10jähriger Außenlagerung eine um bis zu rd. 80% geringere Carbonatisierungstiefe bestimmt wurde. Möglicherweise ist die in [Sha 92, Tan 97] ermittelte Verfeinerung des Porensystems für den erhöhten Widerstand gegenüber dem Eindringen von Chloriden und Kohlendioxid verantwortlich.

2.4.9 Weiterentwicklung von SRA

Schwindreduzierende Zusatzmittel werden stetig weiterentwickelt. In Japan wurden neuartige Fließmittel entwickelt, die eine schwindreduzierende Wirkung aufweisen sollen. Diese speziellen Fließmittel bestehen aus z. B. PCE-Hauptketten, an denen sich funktionelle Schwindreduzierer-Gruppen befinden. Sugiyama et al. [Sug 98] synthetisierten zwei verschiedene Polycarboxylatether mit jeweils der gleichen funktionellen Schwindreduzierer-Gruppe. Im Vergleich zu den entsprechenden PCE ohne SRA-

Gruppe wurde durch die Verwendung dieser neuartigen Moleküle das Gesamtschwinden von Beton mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,52$ im Alter von 182 Tagen um bis zu rd. 20 % reduziert. Die Verarbeitbarkeitseigenschaften und die Druckfestigkeit Betonen wurden durch diese Moleküle nicht beeinflusst.

Ähnliche Untersuchungen führten auch Nakanishi et al. [Nak 03] durch. Die schwindreduzierende Wirkung von Polycarboxylatethern mit funktionellen Schwindreduzierer-Gruppen war dabei geringer als bei getrennter Verwendung des Polycarboxylatethers und des Schwindreduzierer-Wirkstoffs. Die Schwindreduzierung von Betonen mit den schwindreduzierenden Fließmitteln betrug nach acht Wochen rd. 8 % bis 16 % und nahm mit zunehmendem Alter und sinkendem Wasserzementwert ab.

Collepari et al. [Col 06] verwendeten ein schwindreduzierendes Fließmittel, um Betone mit geringer Schwindneigung herzustellen. Zusätzlich wurde den Betonen Calciumoxid zugemischt, um einen Quelleffekt zu Beginn der Hydratation hervorzurufen. Erwartungsgemäß wurde bei einer Wasserlagerung ein deutliches Quellen der Betone mit Calciumoxid festgestellt. Mit Calciumoxid und dem schwindreduzierenden Fließmittel hergestellte Betone zeigten in konservierender Lagerung gegenüber Referenzproben, die nur mit einem PCE und Calciumoxid also ohne SRA hergestellt wurden, ein deutlich erhöhtes Quellen. Das Gesamtschwinden wurde durch das schwindreduzierende Fließmittel um rd. 50 % bis 90 % reduziert. Teilweise wiesen die Proben über den gesamten Untersuchungszeitraum (sechs Monate) hinweg ein Quellen auf. Nach Ansicht der Autoren erwies sich diese Methode als sehr wirksam, um das Schwinden von Beton auch ohne Nachbehandlung signifikant zu reduzieren. Die Frage, warum Schwindreduzierer-Moleküle das Quellen von Beton in Anwesenheit von Calciumoxid in konservierender Lagerung verstärkten, konnte jedoch nicht geklärt werden.

2.4.10 Anwendungsgebiete von SRA

Die Anwendung von organischen schwindreduzierenden Zusatzmitteln in konstruktivem Beton beschränkt sich bislang noch auf einige wenige Referenzobjekte (Wasserbehälter) [Big 99, Buf 00]. Im Wesentlichen wurden SRA zu Herstellung von großflächigen, horizontalen Bauteilen, wie z. B. Estriche, Bodenplatten, Parkdecks oder Fahrbahnbelägen verwendet. Des Weiteren ist ein Tunnelbauprojekt in den USA bekannt, bei dem Schwindreduzierer im Beton erfolgreich eingesetzt wurde [Buf 00].

Zwei ausgewählte Objekte im deutschsprachigen Raum, bei denen SRA erfolgreich im Beton eingesetzt wurde, sind das Daimler-Benz-Museum in Stuttgart (SRA im Estrichbeton) und der Birtunnel in der Schweiz [Sch 98, Str 00].

In DIN EN 934-2 sind Zusatzmittel für Beton als Stoffe definiert, die während des Mischvorgangs des Betons hinzugefügt werden und die Eigenschaften der Betonmischung im frischen und/oder erhärteten Zustand verändern. Der Masseanteil darf im Allgemeinen 5 % des Zementgehalts im Beton nicht übersteigen. Die Zusatzmittel sollen dabei entsprechend dem Verwendungszweck wirken ohne Schäden zu verursachen. Schwindreduzierende Zusatzmittel sind in DIN EN 934-2 nicht aufgeführt. Somit dür-

fen sie in Deutschland in Betonbauteilen, die in den Geltungsbereich der DIN 1045-2/EN 206 fallen, nur mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung oder einer Zustimmung im Einzelfall eingesetzt werden. Bislang wurde eine solche bauaufsichtliche Zulassung für schwindreduzierende Zusatzmittel nicht erteilt. Ein Grund dafür liegt u. a. darin, dass über die Wirkung dieser Zusatzmittel im Beton nur unzureichende Kenntnisse vorhanden sind.

2.4.11 Zusammenfassung

Der in diesem Abschnitt dargestellte Stand der Kenntnisse lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- SRA reduzieren sowohl das autogene als auch das Gesamtschwinden von normalfesten und hochfesten Betonen. Die Höhe der Schwindreduzierung beträgt hierbei durchschnittlich rd. 40 % bis rd. 50 %, in Ausnahmefällen bis zu 83 %.
- Die 28-Tage Druckfestigkeit von Beton wird durch SRA im Allgemeinen herabgesetzt.
- Über den Einfluss von SRA auf das Porengefüge von Zementstein und Beton liegen bislang nur sehr widersprüchliche Erkenntnisse vor.
- Die Hydratation von Zement wird durch SRA nur in geringem Maße beeinflusst.
- Der Widerstand von Betonen gegenüber eindringendem Chlorid und Kohlendioxid wird durch den Einsatz von SRA teilweise verbessert. Die gleichzeitige Verwendung von SRA und LP-Bildner kann den Frostwiderstand beeinträchtigt.
- Eine Weiterentwicklung schwindreduzierender Zusatzmittel stellen Polycarboxylatether mit funktionellen SRA-Gruppen dar, bei denen die positiven Eigenschaften beider Zusatzmitteltypen im Frisch- und Festbeton kombiniert werden.

Die Literatursauswertung hat gezeigt, dass die Erkenntnisse zum Einfluss schwindreduzierender Zusatzmittel auf die Eigenschaften von Zementstein, Mörtel und Beton teilweise noch sehr lückenhaft oder widersprüchlich sind und derzeit nur einen begrenzten, tendenziellen, Überblick über deren Wirkungsweise geben.

Aus dem Stand der Erkenntnisse lassen sich folgende Fragestellungen ableiten:

- Aus einer Reihe von Arbeiten geht hervor, dass SRA die Oberflächenspannung des Zugabewassers herabsetzen [Ai 97, Ben 01a, Oha 88, Pea 05, Ron 05, Sug 98]. Es wurde jedoch nicht geklärt, welchen Einfluss die Molekülstruktur der SRA auf die Oberflächenspannung und die Zusammensetzung von Porenlösung hat.
- Bislang wird angenommen, dass die Wirkungsweise von SRA allein auf die Reduzierung der Oberflächenspannung zurückzuführen ist (s. Abschnitt 2.4.2). Welcher Zusammenhang zwischen der Oberflächenspannung der Porenlösung und dem Schwinden von Zementstein bzw. Beton besteht, wurde jedoch nicht

systematisch untersucht. Tragen möglicherweise noch weitere Mechanismen zu der schwindreduzierenden Wirkung bei?

- Welchen Einfluss hat die Porenstruktur des Zementsteins auf die schwindreduzierende Wirkung von SRA?
- Trägt neben der reduzierten Oberflächenspannung der Porenlösung möglicherweise auch die Verstärkung der Spaltdruckwirkung der Porenlösung zu einer Verminderung des Schwindens bei?

3 Ziel der Untersuchungen und Lösungsweg

3.1 Ziel

Ziel der im Folgenden dargestellten Untersuchungen war es, den Kenntnisstand über die Einflüsse schwindreduzierender Zusatzmittel auf die Porenlösung, das autogene Schwinden, das Porengefüge, die innere relative Feuchte von Zementstein sowie das Trocknungsschwinden bei unterschiedlicher relativer Luftfeuchte zu erweitern. Anhand der gewonnenen Untersuchungsergebnisse sollte ein Modell abgeleitet werden, mit dem die Wirkungsmechanismen dieser Zusatzmittel erklärt werden können.

3.2 Lösungsweg

Da das Schwinden von Beton im Wesentlichen durch den Zementstein verursacht wird und durch die darin enthaltene Gesteinskörnung i. A. behindert wird, werden in dieser Arbeit Untersuchungen vorgestellt, die zum größten Teil an Zementstein durchgeführt wurden. In Bild 3-1 ist der Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels schematisch dargestellt.

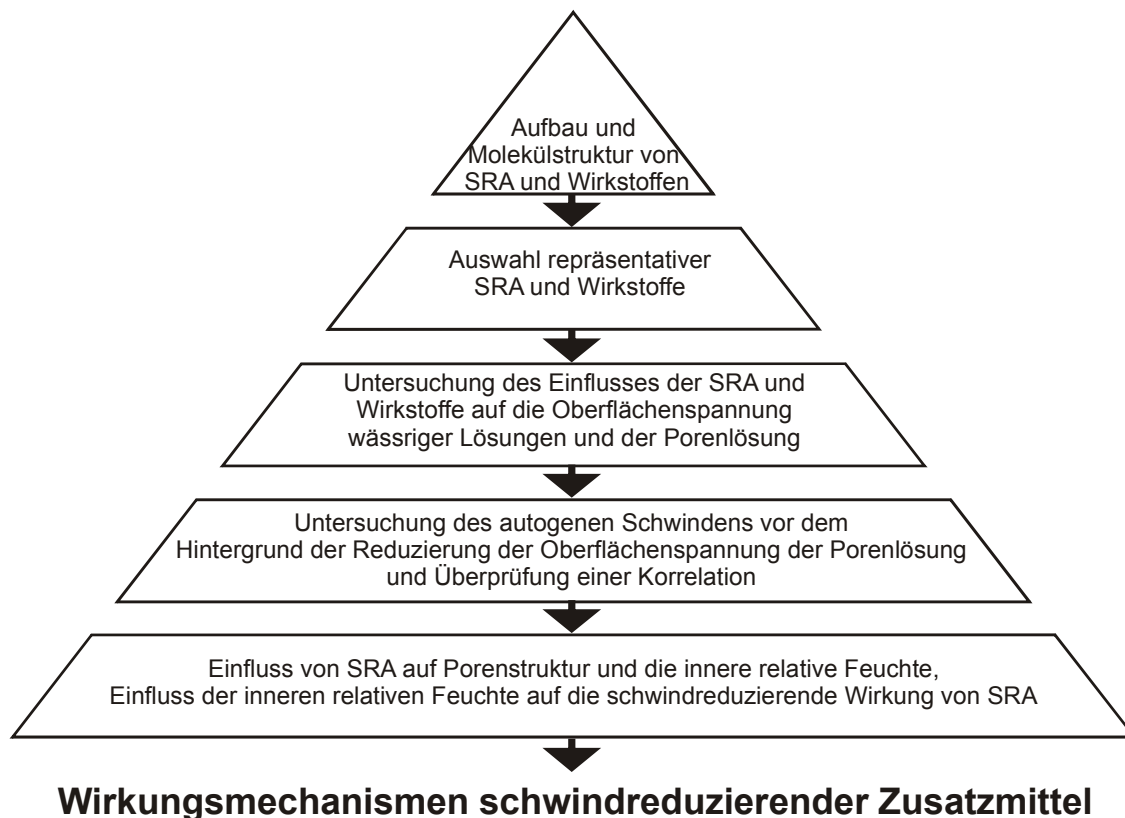


Bild 3-1 Schematische Darstellung der Vorgehensweise und des Arbeitsziels

Eine wirkstoffabhängige Klassifizierung der SRA konnte anhand der vorliegenden Literaturdaten nicht durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Auswahl von drei im Handel erhältlichen Schwindreduzierer sowie zwei Wirkstoffsubstanzen, die in Schwindreduzierern enthalten sein können, getroffen. An wässrigen Lösungen sowie an Porenlösung wird der Einfluss der ausgewählten SRA auf die Oberflächenspannung ermittelt. Zusätzlich wird die Zusammensetzung von Porenlösung bestimmt.

In Abschnitt 2.4.2 wurde dargestellt, dass der Wirkungsmechanismus schwindreduzierender Zusatzmittel bislang auf die herabgesetzte Oberflächenspannung der Porenlösung zurückgeführt wird. In dieser Arbeit wird der Frage nachgegangen, ob die Oberflächenspannung der Porenlösung im Zementstein durch Schwindreduzierer auch dauerhaft über einen längeren Zeitraum reduziert werden kann. Hierzu werden über sechs Monate die Oberflächenspannungen von Porenlösung mit den autogenen Schwindverformungen der entsprechenden Zementsteine korreliert.

Untersuchungen von [Ai 97, Sha 92, Tan 97, Wit 99] belegen, dass das Porengefüge durch SRA verändert werden kann. Eindeutige Aussagen ließen sich daraus jedoch nicht ableiten. Durch systematische Bestimmung der Porosität von Zementstein wird untersucht, wie sich die Porosität durch SRA zeitabhängig verändert und welche Zusammenhänge zwischen Veränderungen im Porengefüge und einer möglichen Schwindreduzierung existieren.

Die Auswertung der Erkenntnisse in Abschnitt 2.1.3.1 zeigt, dass das autogene Schwinden im Wesentlichen auf eine Selbstaustrocknung des Zementsteins während der Hydratation zurückzuführen ist. Bentz et al. [Ben 01a] führten das verringerte autogene Schwinden von Zementstein auf eine durch SRA hervorgerufene erhöhte innere relative Feuchte zurück. Um diese Angaben zu überprüfen, wird der Einfluss von SRA auf die Selbstaustrocknung von Zementstein an konserviert gelagerten Zementsteinproben über einen Zeitraum von drei Monaten systematisch untersucht.

Das Schwinden von Zementstein wird im Wesentlichen durch Änderung der Grenzflächenenergie und des Spaltdrucks verursacht [Set 76, Set 77, Wit 77]. Darüber hinaus können Kapillarkräfte den Spaltdruck verstärken [Pow 68]. Die relative Luftfeuchte beeinflusst hierbei die Ausprägung dieser Phänomene. Aus [Sat 83] geht hervor, dass mit abnehmender relativer Umgebungsfeuchte die schwindreduzierende Wirkung von SRA zunahm. Unterhalb von 45 % r. F. wurde hierbei keine weitere Zunahme der Wirkung der SRA festgestellt. Dies deutet darauf hin, dass SRA Einfluss auf den Spaltdruck nehmen können und die Grenzflächenenergie des Zementsteins im Allgemeinen nicht beeinflussen. Um den Einfluss der SRA auf die Grenzflächenenergie des Zementsteins, den Spaltdruck und die Kapillarkräfte zu untersuchen, wird das Schwinden von Zementstein und Mörtel bei unterschiedlicher relativer Luftfeuchte bestimmt.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wird ein qualitatives Modell zu den Wirkungsmechanismen schwindreduzierender Zusatzmittel und Wirkstoffe abgeleitet.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Ausgangsstoffe

4.1.1 Zement

In die Untersuchungen wurden vier Zemente nach DIN EN 197 bzw. DIN 1164 einbezogen, die in Tabelle 4-1 aufgeführt sind.

Tabelle 4-1 Überblick über die verwendeten Zemente und die Bezeichnung

Zement	Bezeichnung des Zementleims bzw. -steins
1	2
CEM I 42,5 R (Na_2O -Äqu. = 0,79 M.-%)	CEM I
CEM I 42,5 R-HS	CEM I-HS
CEM II/A-LL 42,5 R	CEM II
CEM III/A 42,5 N	CEM III

An den Zementen wurden chemisch-mineralogische und physikalische Untersuchungen durchgeführt. Die chemische Zusammensetzung der Zemente wurde nach DIN EN 196-2 mit der Röntgenfluoreszenzanalyse (Alternativverfahren) ermittelt. Zur Beschreibung der physikalischen Eigenschaften der Zemente wurden die Korngrößenverteilungen mit dem Lasergranulometer bestimmt und die spezifische Oberfläche nach Blaine gemessen. Der Wasseranspruch für Normsteife und der Erstarrungsbeginn nach Vicat wurden nach DIN EN 196-3 ermittelt. Die Druckfestigkeitsentwicklung an Normmörteln wurden nach DIN EN 196-1 bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle A-1 und Tabelle A-2, Anhang A, zusammengestellt.

Aus dem Portlandzement CEM I wurden durch die Zugabe entsprechender Mengen an Kaliumhydroxid zum Zugabewasser Zementleime bzw. Zementsteine CEM Ia mit einem Na_2O -Äquivalent von Na_2O -Äqu. = 1,20 M.-% hergestellt.

4.1.2 Zusatzmittel und Wirkstoffe

Alle verfügbaren Daten über die Zusammensetzung der auf dem Markt erhältlichen Schwindreduzierer wurden anhand von Herstellerangaben sowie Patent- und Literaturrecherchen zusammengestellt. Daraus wurden drei Schwindreduzierer (SRA1, SRA2, SRA3) ausgewählt, die in Bezug auf die Zusammensetzung ein breites Spektrum handelsüblicher Schwindreduzierer abdeckten. Des Weiteren wurden in die Untersuchungen auch zwei reine Wirkstoffe mit einbezogen (W1: Dipropylenglykol und W2: Dipropylenglykol-tert.-butyl-ether). Die Zusammensetzung, die empfohlene Dosiermenge sowie die Dichte und die Oberflächenspannung der verwendeten Schwindreduzierer und Wirkstoffe sind in Tabelle A-3, Anhang A, angegeben.

Um den Einfluss der verschiedenen SRA und Wirkstoffe auf den Zementstein vergleichend untersuchen zu können, wurde der Wasserzementwert (Gesamtporenraum) entsprechend konstant gehalten. Deshalb wurden die SRA und Wirkstoffe auf den Wassergehalt angerechnet und im Zugabewasser gelöst zugegeben. Dadurch verringerte sich je nach Zugabemenge an SRA bzw. Wirkstoff der Wasserzementwert bei gleich bleibender Flüssigkeitsmenge. Wenn nicht anders angegeben, beziehen sich die Zugabemengen der SRA und Wirkstoffe stets auf die Masse des Zugabewassers (M.-% v. w).

Die SRA und Wirkstoffe verringerten die Oberflächenspannung des Zugabewassers. Die jeweilige Dosierung wurde so gewählt, dass die Oberflächenspannung des Zugabewassers um rd. 50 % reduziert wurde. Aus Spalte 7 in Tabelle A-3, Anhang A, geht hervor, dass diese Reduzierung durch den Schwindreduzierer SRA3 und den Wirkstoff W2 bei einer Dosierung von rd. 4,5 M. % v. w erreicht wurde. Der Schwindreduzierer SRA1 und der Wirkstoff W1 reduzierten die Oberflächenspannung des Zugabewassers bei vergleichbaren Dosierungen dagegen kaum. Eine 50 %ige Reduzierung der Oberflächenspannung war nur mit sehr hohen Dosierungen von bis zu 100 M.-% v. w erreichbar. Derart hohe Dosierungen würden den Wasserzementwert und damit die Hydratation der Zemente sowie die Porosität des Zementsteins so stark verändern, dass eine Vergleichbarkeit der Wirkung der Schwindreduzierer bzw. Wirkstoffe untereinander nicht mehr gewährleistet wäre. Deshalb wurden der Schwindreduzierer SRA1 und der Wirkstoff W1 ebenfalls mit 4,5 M.-% v. w dosiert. Schwindreduzierer SRA2 reduzierte die Oberflächenspannung bereits bei einer Dosierung von 3,5 M. % v. w um rd. 50 %.

Zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit wurde den Zementleimen mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,25$ Fließmittel auf der Basis von Polycarboxylatether zugegeben. Der Wasseranteil des Fließmittels betrug rd. 70 % und wurde auf den Wassergehalt der Zementleimmischung angerechnet. Je nach Zement variierte die Dosiermenge des Fließmittels zur Einstellung einer vergleichbaren Konsistenz zwischen 0,36 M.-% v. z und 0,80 M.-% v. z. Innerhalb einer Versuchsserie mit gleichem Zement wurde die Fließmittelmenge konstant gehalten, um eine Vergleichbarkeit der Zementsteine ohne und mit Schwindreduzierer sicherzustellen.

4.1.3 Gesteinskörnung

Für die Mörtelmischungen wurde CEN-Normsand nach DIN EN 196-1 mit einer maximalen Korngröße von 2 mm der Normensand GmbH, Beckum, verwendet.

4.1.4 Zugabewasser

Alle Untersuchungen wurden mit deionisiertem Düsseldorfer Leitungswasser durchgeführt. Das Wasser wurde auf rd. $(10 \pm 2)^\circ\text{C}$ temperiert, um eine Leim- bzw. Mörteltemperatur von rd. 20°C zu erreichen.

4.2 Zusammensetzung, Herstellung und Lagerung

4.2.1 Zementleim

Es wurden Zementleime mit Wasserzementwerten von $w/z = 0,25$, $w/z = 0,42$ und $w/z = 0,50$ hergestellt. Die Herstellung der Leime und Mörtel erfolgte zum größten Teil in einem Rego-Mischer mit einem Nennvolumen von rd. 13 Liter. Für geringere Mengen bis zwei Liter wurde ein Hobart-Mischer verwendet.

Zur Herstellung homogener und agglomeratfreier Leime wurde der Zement bei rd. 140 U/min in rd. drei Viertel des Zugabewasser-SRA-Gemisches innerhalb von 30 Sekunden eingerührt. Nach weiteren 60 Sekunden Mischzeit wurde das restliche Zugabewasser mit dem darin enthaltenen Schwindreduzierer zugegeben und für 30 Sekunden gemischt. Nach einer Mischpause von rd. 60 Sekunden wurden die Leime für weitere 60 Sekunden bei rd. 285 U/min gemischt. Bei Zementleimen mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,25$ wurde das Fließmittel rd. 90 Sekunden nach dem Mischbeginn zugegeben.

Da die Zementleime mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,50$ stark sedimentierten und bluteten, wurden die Leime für eine Dauer von rd. 4 Stunden im Halbstundentakt für rd. 30 Sekunden bei rd. 140 U/min aufgerührt, bis sich kein Wasser mehr an der Oberfläche absetzte. Danach wurden das Setzfließmaß und der Luftgehalt (Abschnitt 5.2) bestimmt und die Probekörper hergestellt.

Innerhalb der ersten 24 Stunden nach der Herstellung wurden alle Probekörper mit Folie und Glasplatte abgedeckt in der Schalung im Klima (20 ± 2) °C und > 95 % r. F. gelagert. Danach wurden folgende Lagerungen unterschieden:

- Lagerung L1: konservierend bei (20 ± 2) °C

Alle Prüfkörper zur Bestimmung des autogenen Schwindens wurden in nahezu diffusionsdichter und mit Bienenwachs sowie Klebeband abgedichteter Edelstahlfolie konserviert.

Die Prüfkörper zur Bestimmung der Porosität wurden in zwei-lagiger, mit Klebeband abgedichteter Polyethylenfolie konserviert.

- Lagerung L2: sechs Tage konserviert bei (20 ± 2) °C, danach jeweils bis zum Erreichen der Massekonstanz bei 100 %, 86 %, 66 %, 44 %, 23 % oder 0 % r. F. (nur für Bestimmung des Trocknungsschwindens von Zementstein)

4.2.2 Mörtel

Mörtelprismen zur Bestimmung der Zement-Normdruckfestigkeit wurden nach DIN EN 196-1 hergestellt, verdichtet, gelagert und geprüft.

Mörtel zur Bestimmung des Kapillarschwindens wurden unter Verwendung von CEN-Normsand in Anlehnung an DIN EN 196-1 hergestellt, verdichtet und wie folgt gelagert:

- 24 h nach der Herstellung mit Folie und Glasplatte abgedeckt in der Schalung im Klima (20 ± 2) °C und > 95 % r. F.
- bis zum Erreichen der Massekonstanz im Alter von 56 Tagen unter Wasser bei (20 ± 2) °C, danach
- bis zum Erreichen der Massekonstanz im Alter von 70 Tagen in einem Trocknungsschrank bei (40 ± 2) °C, danach
- bis zum Erreichen der Massekonstanz im Alter von 105 Tagen in Wasser bzw. in wässriger SRA-Lösung bei (20 ± 2) °C, danach
- im Klima 20/65

4.3 Angewendete Untersuchungsmethoden und –verfahren

4.3.1 Charakterisierung der Zusatzmittel und Wirkstoffe

4.3.1.1 Bestimmung der Oberflächenspannung

Von Schwindreduzieren und Wirkstoffen in unverdünnter Form sowie von wässrigen Lösungen mit SRA-Gehalten zwischen 0 % und 50 % wurde die Oberflächenspannung ermittelt. Die Lösungen wurden mit deionisiert Wasser hergestellt. Die Oberflächenspannung wurde mit der Ringmethode nach DIN EN 14210 mit einem Tensiometer vom Typ K10 der Firma Krüss GmbH, Hamburg, bestimmt.

4.3.1.2 IR-Spektroskopie

IR-Spektren der Schwindreduzierer und der Wirkstoffe wurden mit einem IR-Spektrometer 1760-X (Infrared Fourier Transform Spectrometer) der Fa. Perkin Elmer über einen Wellenzahlenbereich von 4000 bis 450 cm^{-1} aufgenommen. Zur Aufnahme der IR-Spektren dienten KBr-Presslinge. Zur Herstellung der KBr-Presslinge wurden 1 bis 3 mg Probe mit 300 mg KBr intensiv in einem Mörser zerkleinert und gemischt. Aus dieser Mischung wurden bei mit Last von 8 bis 12 t in einem vakuumierten Presswerkzeug Presslinge hergestellt. Die Presslinge wurden zwei Stunden im Trockenschrank bei 80 °C getrocknet. Danach wurden die IR-Spektren aufgenommen.

4.3.1.3 Gaschromatographie

Die Schwindreduzierer und Wirkstoffe wurden in einem Gaschromatograph HP 5890 II mit Flammenionisationsdetektor analysiert. Als Trägergas wurde Helium und als stationäre Phase 5 % Phenyl - 95 % Dimethylpolysiloxan verwendet.

4.3.2 Charakterisierung der Porenlösung

4.3.2.1 Gewinnen von Porenlösung

Nach der Herstellung wurde der Zementleim in HD-PE-Flaschen mit einem Fassungsvermögen von rd. 300 ml eingefüllt, verdichtet und ohne Lufteinschluss verschlossen.

Um eine Sedimentation der Leime zu vermeiden, wurden die Flaschen direkt nach dem Verschließen in einer Überkopfschüttelanlage 24 Stunden rotiert.

Zur Gewinnung der Porenlösung (PL) wurden die Zementsteine mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,42$ mit Hilfe einer Auspressvorrichtung mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,12 MPa/s bis 260 MPa und anschließend mit 0,42 MPa/s bis insgesamt 780 MPa ausgepresst. Die Porenlösung lief während des Pressvorgangs über einen Teflonschlauch aus der Auspressvorrichtung in ein Polypropylen-Röhrchen. Für die Proben wurden jeweils verschiedene Schläuche benutzt, um eine Kontaminierung der Proben mit organischen Substanzen zu vermeiden. Die Teflonschläuche wurden nach jedem Pressvorgang mit heißem, deionisiertem Wasser gereinigt. Die Porenlösung wurde über einen 0,45 μm -Teflon-Membranfilter filtriert, mit Argon überspült und in dicht verschließbaren Polypropylen-Röhrchen gelagert.

4.3.2.2 Bestimmung der Oberflächenspannung

Die Oberflächenspannung von Porenlösungen von Zementsteinen wurde im Alter von 2, 7, 28, 91 und 182 Tagen bestimmt. Auf Grund des niedrigen Wasserzementwerts ($w/z = 0,42$) konnten mit zunehmendem Alter meist nur wenige Milliliter Porenlösung gewonnen werden. Deshalb erfolgte die Messung der Oberflächenspannung nicht mit der Ring-Methode, sondern in Anlehnung an die WILHELMY Plattenmethode. Hierzu wurde eine gebogene Platin-Platte mit einem Durchmesser von 6,6 mm und einer Höhe von 10,0 mm verwendet. Die jeweilige Probemenge betrug rd. 0,35 ml. Der Versuchsaufbau ist in Bild B-1, Anhang B, dargestellt. In Vergleichsmessungen an Wasser und wässrigen SRA-Lösungen wurde festgestellt, dass die angewendeten Messmethode zu gleichen Ergebnissen wie mit der Ringmethode führt.

4.3.2.3 Chemische Analysen

Ein Teil der Porenlösung wurde im Alter von 2, 7, 28, 91 und 182 Tagen mit Salpetersäure chemisch stabilisiert und die Gehalte an Kalium und Natrium ionenchromatographisch bestimmt. An einem anderen Teil der Lösung wurde der TOC-Gehalt (Total Organic Carbon) durch thermisch-katalytische Oxidation/IR Detektion bestimmt. Für jeden Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff wurde eine Kalibrierungsgerade an Lösungen mit bekannten Dosierungen erstellt. Hieraus wurden die entsprechenden SRA-Gehalte berechnet.

4.3.3 Untersuchungen an Zementleim und Frischmörtel

Am Zementleim und am Frischmörtel wurden nach 10 Minuten die Temperatur und das Setzfließmaß in Anlehnung an DIN EN 459-2 sowie der Luftgehalt nach DIN EN 413-2 bestimmt. Die Verdichtung der Leime bzw. Mörtel im LP-Topf sowie in den Prismenformen erfolgte in allen Fällen auf einem Vibrationstisch-Typ A in Anlehnung an DIN EN 196-1 in zwei Lagen. Leime mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,42$ und $w/z = 0,50$ wurden rd. 60 Sekunden, Leime mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,25$ rd. 120 Sekunden verdichtet.

Probekörper aus Zementmörtel zur Bestimmung des Trocknungsschwindens wurden in Stahlformen mit je drei Prismen mit den Abmessungen (40 x 40 x 160) mm³ hergestellt. Zementsteinprismen zur Bestimmung des Trocknungsschwindens in unterschiedlicher relativer Luftfeuchte wurden in Stahlformen mit je sechs Prismen mit den Abmessungen (10 x 40 x 160) mm³ hergestellt. Für Prüfkörper zur Bestimmung der Porosität mittels Quecksilberintrusionsmessung wurden je neun Würfel mit einer Kantenlänge von 40 mm in Stahlformen hergestellt.

4.3.4 Untersuchungen an Zementstein

4.3.4.1 Versuchsumfang

Eine Übersicht über die an Zementstein durchgeführten Untersuchungen ist in Tabelle 4-2 dargestellt. Im Tabellenkopf sind die Zementsteine, die Wasserzementwerte und die Art der Untersuchung angegeben. Die jeweils eingesetzten Schwindreduzierer und Wirkstoffe wurden den Untersuchungen in Abhängigkeit des entsprechenden Zementsteins und Wasserzementwerts zugeordnet.

Die überwiegende Anzahl der Zementsteinproben wurden mit dem Portlandzement CEM I der Festigkeitsklasse 42,5 R hergestellt, der für diese Festigkeitsklasse hinsichtlich seiner mechanischen und physikalischen Eigenschaften ein repräsentatives Spektrum der in Deutschland hergestellten Portlandzemente darstellt. Der Einfluss der Zementart auf die Wirkungsweise schwindreduzierender Zusatzmittel und Wirkstoffe wurde an Zementsteinen aus den drei weiteren, in Tabelle 4-1 angegebenen Zementen ermittelt.

Tabelle 4-2 Übersicht über die Zusammensetzung von Zementstein und die daran durchgeführten Untersuchungen

Zementstein		Art der Untersuchung					
Zement	w/z-Wert	Poren-lösung	autogenes Schwinden	Poren-gefüge	Innere r. F.	Schwinden bei versch. r. F.	Hydratation
1	2	3	4	5	6	7	8
CEM I	0,25		SRA1, SRA3, W1, W2	SRA1, SRA3, W1, W2	SRA1, SRA3, W1, W2	W1, W2	SRA1, SRA3, W1, W2
	0,42	SRA1, SRA2, SRA3, W1, W2	SRA1, SRA2, SRA3, W1, W2	SRA1, SRA2, SRA3, W1, W2	SRA1, SRA2, SRA3, W1, W2	SRA3, W1, W2	SRA1, SRA2, SRA3, W1, W2
	0,50	W1, W2	W1, W2				
CEM Ia	0,25		W1, W2				
	0,42	SRA3	SRA3, W1, W2	SRA3, W1, W2	SRA3, W1, W2		
CEM I-HS	0,25		W1, W2				
	0,42	SRA3	SRA3, W1, W2	SRA3	SRA3		
CEM II	0,25		W1, W2				
	0,42	SRA3	SRA3, W1, W2	SRA3	SRA3		
CEM III	0,25		W1, W2				
	0,42	SRA3	SRA3, W1, W2	SRA3, W1, W2	SRA3, W1, W2		

4.3.4.2 Autogenes Schwinden

Zur Ermittlung des autogenen Schwindens und seiner zeitlichen Entwicklung im frühen Alter wurde die in Bild B-2 und Bild B-3, Anhang B, dargestellte Versuchseinrichtung entwickelt. Die Abmessungen der Probekörper betragen in Anlehnung an die ASTM-Norm C157M-04 rd. (25 x 25 x 290) mm³. Die Versuchseinrichtung bestand aus zwei seitlichen Stahlprofilen, die zusammen mit zwei Endplatten aus Stahl auf einer Grundplatte befestigt waren. Dieser Rahmen bildete die Schalung für die Zementleim/-steinprobe. Eine Filz- und eine Polyethylenfolie auf der Grundplatte gewährleisteten eine reibungsarme Lagerung der Prüfkörper während der Messung. Die seitlichen Flächen wurden zunächst über Winkелеlemente gestützt, die zu Beginn der Messung entfernt wurden, so dass keine Wandreibung auftreten konnte.

Die Zementleime wurden direkt im Anschluss an die Herstellung in die mit Edelstahlfolie ausgekleideten Formen gegossen, verdichtet und verschlossen. Zusätzlich erfolgte eine Abdichtung mit Bienenwachs sowie Klebeband. Dadurch wurde eine Austrocknung der Probekörper während der Messung verhindert.

Die Verbindung zwischen Zementleim/Zementstein und Schalung erfolgt über Kopfplatten, die an den Stirnseiten der Schalung kraftschlüssig befestigt wurden. In den Kopfplatten waren neun Gewindebolzen eingeschraubt, über die die Ankopplung an den Zementstein erfolgte (s. Bild B-3, Anhang B). Unmittelbar vor Messbeginn wurde die vordere Endplatte der Schalung entfernt, so dass das Balkenende frei verschiebbar war.

Die Längenänderungen der Prismen wurden kontinuierlich über digitale Glasmessstaster, die mechanisch mit einer geringen Anpresskraft von 0,3 N an der vorderen Kopfplatte der Prismen angekoppelt waren, erfasst. Im Versuchsstand (Bild B-2, Anhang B) wurde das autogene Schwinden von bis zu sechs Proben gleichzeitig und unabhängig voneinander bestimmt.

Die zeitliche Abfolge von der Herstellung der Zementleime bis zur Messung des autogenen Schwindens und die einzelnen Arbeitsschritte sind in Bild 4-1 dargestellt. Bis zum Beginn der Messung im Alter von sechs ($w/z = 0,25$ und $w/z = 0,42$) bzw. acht Stunden ($w/z = 0,50$) nach Wasserzugabe wurden die Probekörper bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ gelagert. Zu Messbeginn wiesen die Zementsteine eine ausreichende Steifigkeit auf, damit die mechanische Ankopplung der Messtaster erfolgen konnte. Es wird davon ausgegangen, dass durch den geringen Querschnitt entstehende Hydratationswärme schnell abgeführt und somit das Messergebnis dadurch nur unwesentlich beeinflusst wurde. Das bestätigen Messungen von Eppers und Müller [Epp 08], bei denen in diesem Versuchsstand an Probekörpern mit gleichen Abmessungen maximale Temperaturänderungen von rd. 1,2 K bei ultrahochfesten Betonen mit einem Zementgehalt von 800 kg/m^3 und einem Wasserzementwert von $w/z = 0,23$ ermittelt wurden.

Beginn je Arbeitsschritt [h]	Dauer je Arbeitsschritt [h]	Arbeitsschritt
0:00	0:15	Herstellung des Zementleims und Einfüllen in die Form
0:15	0:30	Versiegelung der Probekörper in der Form (vollständige Versiegelung)
0:45	4:45	Lagerung der Probekörper in den Formen bei $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$
5:30	0:30	Ankopplung der Messtaster
6:00		Start der Messung
~ 168 (7 d)	~ 162	Ausbau der Probekörper

Bild 4-1 Zeitliche Abfolge und Arbeitsschritte von der Herstellung der Zementleime bis zur Messung des autogenen Schwindens

In Abschnitt 2.1.3.1 ist dargestellt, dass das autogene Schwinden im Wesentlichen auf die Selbstaustrocknung des Zementsteins zurückzuführen ist. Der Zeitpunkt, zu dem die innere Austrocknung im erhärtenden Zementstein beginnt, ist schwierig zu bestimmen. Daher werden experimentell häufig Konventionen verwendet, um den Beginn des autogenen Schwindens festzulegen. Häufig wird dieser betonspezifische und temperaturabhängige Beginn als „time-zero“ (t_0 , Nullzeitpunkt) bezeichnet. Nach Weiß ist t_0 der Zeitpunkt, ab dem sich aus dem Zementleim ein Festkörper bildet, der Zugspannungen übertragen kann [Wei 03].

Zur Bestimmung von t_0 ist nach der Definition des Japan Concrete Institute der Erstarrungsbeginn per Nadelpenetrationsverfahren zu ermitteln [Jci 98]. Ähnlich häufig wie dieses t_0 -Kriterium wird jedoch auch das Erstarrungsende verwendet. Die Ergebnisse der Messungen des autogenen Schwindens können je nach Nullzeitpunkt deutlich abweichen. Die Rate des chemischen Schwindens verlangsamt sich beim Übergang vom flüssigen zum festen Zustand deutlich und erlaubt dadurch ebenfalls gewisse Rückschlüsse auf den Beginn des autogenen Schwindens [San 06, Jus 00]. Fontana [Fon 06] definiert t_0 als den Zeitpunkt der maximalen Verformungsgeschwindigkeit, zu dem ein Übergang vom plastischen in den festen Zustand erfolgt und zu dem Zugspannungen im Zementstein übertragen werden können. Diese Verformungen werden als „spannungs-induzierendes autogenes Schwinden“ bezeichnet.

In dieser Arbeit wurde als t_0 der Zeitpunkt gewählt, bei dem die maximale Verformungsgeschwindigkeit auftritt. Die Zeitpunkte t_0 der jeweiligen maximalen Verformungsgeschwindigkeiten sind in Tabelle 4-3 dargestellt. Bei den Zementsteinen mit $w/z = 0,42$ lagen die Zeitpunkte der maximalen Verformungsgeschwindigkeit deutlich über denen mit $w/z = 0,25$. Zudem wurde bei den meisten Zementsteinen mit $w/z = 0,42$ ein deutliches Quellen zu Beginn der Messungen festgestellt (s. Abschnitt 5.3.3). Dies wird darauf zurückgeführt, dass aufstehendes Blutwasser mit fortschreitender Hydratation vom Zementstein aufgenommen wurde. Die dabei entstehenden Quelldrücke überlagerten das chemische Schwinden und führten zu einem autogenen Quellen. Nach Abschluss dieser Quellphase gingen die Zementsteine in eine Schwindphase über, zu deren Beginn die maximalen Verformungsgeschwindigkeiten auftraten. Es ist plausibel, diese Zeitpunkte der maximalen Verformungsgeschwindigkeit als t_0 festzulegen, wenn man davon ausgeht, dass ab diesen Zeitpunkten im erhärtenden Zementstein Zugspannungen entstehen und übertragen werden können.

Tabelle 4-3: Zeitpunkte t_0 der jeweils maximalen Verformungsgeschwindigkeit ab Wasserzugabe

w/z-Wert	Bezeichnung	t_0 in hh:min				
		CEM I	CEM Ia	CEM I-HS	CEM II	CEM III
1	2	3	4	5	6	7
0,25	Referenz	7:05	6:00	8:25	6:30	8:20
	SRA1	7:35	n. b.			
	SRA3	8:20				
	W1	8:05	6:00	10:45	7:45	9:55
	W2	7:50	6:00	10:10	6:00	8:40
0,42	Referenz	12:20	8:10	19:15	20:55	18:55
	SRA1	15:45	n. b.			
	SRA2	12:45				
	SRA3	13:00	10:45	20:40	27:25	21:00
	W1	17:55	9:35	17:50	13:25	19:00
	W2	21:50	13:45	33:55	30:25	23:55
0,50	Referenz	10:50	n. b.			
	W1	15:40				
	W2	17:25				

n. b.: nicht bestimmt

In der Regel wurden die Proben über einen Zeitraum von sieben Tagen kontinuierlich gemessen. Danach wurden sie aus dem Versuchsstand ausgebaut und in einer Messeinrichtung nach DIN 52450 (Verfahren nach Graf-Kauffmann) weiter gemessen. Dazu wurden in die Prismen stirnseitig modifizierte Messmarken nach DIN 52450 vom

Typ 1, Form AB eingeschraubt und verklebt (Bild B-4, Anhang B). Die Anzeigegenauigkeit der Messeinrichtung betrug 0,0005 mm.

4.3.4.3 Trocknungsschwinden von Zementmörtel

Das Trocknungsschwinden wurde an Prismen mit den Abmessungen (40 x 40 x 160) mm³ in Anlehnung an DIN 52450 in einem senkrecht stehenden Messgerät vom Typ B mit digitaler Anzeige (Verfahren nach Graf-Kauffmann) bestimmt. Die Anzeigegenauigkeit der Messuhr betrug 0,0005 mm. Der Versuchsaufbau ist in Bild B-5, Anhang B, dargestellt.

Die Ausgangsmessung erfolgte im Alter von 105 Tagen nach der Lagerung in Wasser bzw. SRA-Lösung (s. Abschnitt 4.2.2). Die weiteren Messungen wurden nach 2, 3, 7, 14, 28, 56, 91, 182 und 364 Tagen durchgeführt.

4.3.4.4 Trocknungsschwinden von Zementstein bei unterschiedlicher relativer Luftfeuchte

Zementsteinprismen mit $w/z = 0,25$ und $w/z = 0,42$ mit Abmessungen (10 x 40 x 160) mm³ wurden bis zu sieben Tage konserviert und danach bis zum Erreichen der Massekonstant bei einer relativen Luftfeuchte von rd. 100 % über Wasser gelagert. Nach dieser Vorlagerung waren die Hydratation und das autogene Schwinden im Wesentlichen abgeschlossen und alle Prismen wiesen im Inneren eine relative Luftfeuchte von rd. 100 % auf. Danach wurden die Prismen über verschiedenen gesättigten Salzlösungen mit entsprechender relativer Luftfeuchte von 86 % bis 23 % bis zum Erreichen der jeweiligen Ausgleichsfeuchte, mindestens aber für 140 Tage ($w/z = 0,25$) bzw. 91 Tage ($w/z = 0,42$) in Exsikkatoren gelagert (Lagerung L2, s. Abschnitt 4.2.1). Auf Grund des dichteren Gefüges erreichten Prismen mit $w/z = 0,25$ die Ausgleichsfeuchte erwartungsgemäß deutlich später als mit $w/z = 0,42$. Als Bezugsgröße für das Trocknungsschwinden wurde die jeweilige Länge der Prismen bei 100 % r. F., d. h. im vollständig wasserdampfgesättigten Zustand gewählt.

Mit Ventilatoren wurde die Luft im Inneren der Exsikkatoren mit einer maximalen Windgeschwindigkeit von rd. 0,4 m/s umgewälzt, um die Anforderungen der DIN 50014 an Normalklimate diesbezüglich zu erfüllen. Die Auswahl der dafür erforderlichen Salze bzw. Trocknungsmittel erfolgte nach DIN 50008-1 und ist in Tabelle A-16, Anhang A, dargestellt. Die Messungen des Trocknungsschwindens bei der jeweiligen relativen Luftfeuchte wurden in Anlehnung an DIN 52450 in einem senkrecht stehenden Messgerät vom Typ B mit digitaler Anzeige (Verfahren nach Graf-Kauffmann) bestimmt. Die Anzeigegenauigkeit der Messuhr betrug 0,0005 mm. Die Messungen wurden nach 1, 2, 3, 7, 14, 28, 42, 56, 70, 84, 91, 98, 112, 126 und 140 Tagen Lagerungsdauer in der jeweiligen relativen Luftfeuchte durchgeführt.

4.3.4.5 Quecksilberintrusion

Das in der vorliegenden Arbeit verwendete Verfahren der Quecksilberintrusion beruht auf der Messung des in einen porösen Feststoff unter steigendem Druck eingepressten

Quecksilbervolumens nach dem Verfahren von Ritter und Drake und erfolgte gemäß DIN 66133. Der aufzuwendende Druck ist bei dem Verfahren umgekehrt proportional zur Porenöffnung. Aus den gemessenen Werten wurde mit Hilfe der Washburn-Gleichung unter der Annahme eines Zylinderporenmodells die Porenradienverteilung berechnet. Hierzu wurden Quecksilberdruckporosimeter vom Typ Pascal 140/240 sowie vom Typ Pascal 140/440 der Firma Thermo/Fisher eingesetzt. Zur Berechnung der Porositäten wurden der Randwinkel, den das Quecksilber mit dem Zementstein bildet mit $141,3^\circ$ und die Oberflächenspannung des Quecksilbers mit 480 mN/m angesetzt. Die Prüftemperatur betrug 20°C . Zementstein mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,42$ wurde bis zu einem Enddruck von 2000 bar geprüft. Dabei wurden Porenradien zwischen rd. $50 \mu\text{m}$ und $3,4 \text{ nm}$ ermittelt. Zementstein mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,25$ bzw. Zementmörtel mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,50$ wurden bis zu einem Enddruck von 4000 bar geprüft. Bei diesem Enddruck wurden Porenradien zwischen rd. $50 \mu\text{m}$ und rd. $1,7 \text{ nm}$ erfasst. Die Auswertung erfolgte automatisch über ein an das Messgerät angeschlossenes Rechnersystem.

Die für die Untersuchung erforderlichen prüfgerechten Teilproben wurden zum Prüfzeitpunkt aus Würfeln mit einer Kantenlänge von 40 mm gewonnen. Die Proben wurden über Silicagel rd. 24 Stunden vakuumgetrocknet ($p = 1 \times 10^{-3} \text{ mbar}$). Unmittelbar im Anschluss an die Trocknung wurden die Quecksilberintrusionsmessungen durchgeführt. Voruntersuchungen an Zementstein zeigten, dass bei Bestimmung der Porosität mehrerer Teilproben aus einer oder mehreren Proben nur sehr geringe Abweichungen aufwiesen.

4.3.4.6 Innere relative Feuchte von Zementstein

Während der Hydratation von Zement wird Wasser verbraucht und in die Hydratationsprodukte des Zements eingebaut. Steht nicht genügend Wasser für eine vollständige Hydratation des Zements zur Verfügung, fällt die relative Feuchte (r. F.) im Inneren des Zementsteins und eine innere Austrocknung (Selbstaustrocknung) ist die Folge. Diese Selbstaustrocknung wurde durch die Messung der Ausgleichsfeuchte bestimmt, die sich über hydratisierendem Zementstein bei vollständiger Konservierung einstellte. Hierzu wurde rd. 1000 ml Zementleim in eine dicht schließende HD-PE-Flasche mit einem Fassungsvermögen von rd. einem Liter eingefüllt. Im Anschluss an die Herstellung wurde in den noch plastisch verformbaren Zementleim ein Zylinder aus Polyethylen eingeführt. Im Alter zwischen 20 und 22 h wurde der Polyethylen-Zylinder aus dem Zementstein entfernt und in die Öffnung wurde ein Feuchtesensor eingeführt, der somit allseitig von Zementstein umgeben war (siehe Bild B-6, Anhang B). Die Messung wurde im Alter von rd. 24 Stunden begonnen und bis zum Erreichen der jeweiligen Ausgleichsfeuchte durchgeführt. Die Ausgleichsfeuchte stellte sich je nach Mischungszusammensetzung innerhalb von rd. 14 bis rd. 91 Tagen ein. Stellte sich die relative Feuchte vor 91 Tagen ein, wurde der Feuchtesensor aus der Probe entfernt und die Probe luftdicht verschlossen. Im Alter von 91 Tagen wurde die jeweilige innere relative Feuchte nochmals punktuell bestimmt.

Die Messung beruht auf der Annahme, dass die Feuchte, die der Zementstein in den Hohlraum abgibt, in dem sich der Messfühler befindet, mit der relativen Feuchte im Zementstein im Gleichgewicht steht.

Die verwendeten Feuchtesensoren arbeiten nach dem Prinzip der Längenänderung hygroskopischer Kunststofffasern. Der sich bei Änderung der Feuchte ändernde Widerstand im Messelement wurde über ein Messerfassungssystem vom Typ 34970 A der Fa. Agilent Technologies mit drei 20-Kanal-Multiplexer-Modulen einmal stündlich erfasst.

Für jeden Feuchtesensor wurde mittels einer Dreipunktmessung in einer relativen Feuchte von jeweils 86 %, 93 % und 100 % r. F. (Wasser) eine charakteristische Kennlinie ermittelt. Die Feuchten wurden über verschiedenen gesättigten Salzlösungen nach DIN 50008-1 eingestellt. Über diese Kennlinie wurde die relative Luftfeuchte im Zementstein berechnet.

4.3.4.7 Hydratationswärmeentwicklung

An Zementleimen mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,25$ und $w/z = 0,42$ wurde die Hydratationswärmeentwicklung mit einem Differenzial-Wärmefluss-Kalorimeter (DCA) der Fa. TONICAL bei 20 °C unter nahezu isothermen Bedingungen ermittelt. Als Inertprobe diente vollständig hydratisierter Zementstein. Die Feststoffeinwaage betrug bei den Untersuchungen jeweils 10 g. Als Probengefäße dienten handelsübliche Reagenzgläser. Die Schwindreduzierer wurden im Zugabewasser gelöst zugegeben. Nach Wasserzugabe wurden die Gemische mittels Rührer im DCA jeweils rd. 20 Sekunden homogenisiert. Die Hydratationswärmeentwicklung wurde über einen Zeitraum von rd. 72 Stunden ermittelt.

4.3.4.8 Rasterelektronenmikroskopie

Für rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen wurde Zementleim nach dem in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Verfahren hergestellt und luftdicht in HD-PE-Röhrchen mit einem Fassungsvermögen von rd. 10 ml eingebracht und verdichtet. Bis zum Prüftermin, maximal jedoch für 24 Stunden, wurden die Proben in einer Überkopfschüttelanlage rotiert, um eine Sedimentation zu vermeiden. Danach wurden die Proberröhrchen bis zum Prüftermin bei (20 ± 2) °C gelagert.

Für die Untersuchungen wurde ein „Environmental Scanning Electron Microscope“ (ESEM) vom Typ Philips XL 30 ESEM-FEG eingesetzt, das mit einem semiquantitativen, energiedispersiven Röntgenspektrometer ausgestattet ist. Die Analysen erfolgten an Bruchstücken hydratisierter Zementsteinproben, die bis zum Prüftermin konserviert in HD-PE-Proberröhrchen gelagert wurden. Das Rasterelektronenmikroskop wurde vor allem zur Identifizierung und morphologischen Charakterisierung der Reaktionsprodukte eingesetzt. Im Alter von sechs und 24 Stunden wurden die Untersuchungen im Hochvakuum (REM-Modus) bzw. im Niedervakuum (ESEM-Modus) durchgeführt. Im Alter von sieben und 28 Tagen wurden die Proben im Hochvakuum (REM-Modus) untersucht. Zur Vermeidung elektrischer Aufladungen wurden die Proben vor den Untersuchungen im Hochvakuum mit einer rd. 30 nm dicken Goldschicht bedampft.

5 Darstellung und Erörterung der Untersuchungsergebnisse

5.1 Eigenschaften von Schwindreduzierern und deren wässriger Lösungen

5.1.1 Auswahl, Nachweis und Identifizierung der Schwindreduzierer

Es wurden die Schwindreduzierer SRA1, SRA2 und SRA3 ausgewählt, die ein breites Spektrum handelsüblicher Schwindreduzierer abdeckten. Für die Zusatzmittel SRA1 und SRA3 konnten durch Literatur- und Patentrecherchen die wesentlichen Wirkstoffe ermittelt werden. Diese Wirkstoffe wurden über einen Chemikalienhandel bezogen, gaschromatografisch charakterisiert und mit den Wirkstoffen in den entsprechenden handelsüblichen Schwindreduzierern verglichen.

Eine Übersicht der mit Gaschromatografie ermittelten Wirkstoffe bzw. Herstellerangaben ist in Tabelle A-3, Anhang A, dargestellt. Im handelsüblichen Schwindreduzierer SRA1 wurde der Wirkstoff 2,2-Dimethyl-1,3-propandiol, auch unter dem Trivialnamen Neopentylglykol bekannt, qualitativ nachgewiesen. Der quantitative Nachweis des Wirkstoffs konnte bei diesem Zusatzmittel nicht erbracht werden. Die für den Schwindreduzierer SRA2 vom Hersteller angegebenen Wirkstoffsubstanzen polyoxalkylen Alkylether bzw. Poly(Ethylenglykol-ran-Propylenglykol) Monobutylether konnten mittels Gaschromatographie weder qualitativ noch quantitativ bestimmt werden. In Schwindreduzierer SRA3 wurden die Wirkstoffsubstanzen Dipropylenglykol und Dipropylenglykol-tert.-butyl-ether in Anteilen zu jeweils rd. 50 % nachgewiesen (s. Tabelle A-3, Anhang A).

Bei IR-spektroskopischen Untersuchungen ergaben sich keine charakteristischen Peaklagen, so dass die Wirkstoffe mit dieser Methode weder quantitativ noch qualitativ beurteilt werden konnten.

Zur Herstellung der Zementleime wurden Schwindreduzierer aus jeweils einer Lieferung verwendet.

Um zunächst einen grundlegenden und umfassenden Überblick über den Einfluss handelsüblicher SRA und darin enthaltener Wirkstoffe zu erarbeiten, wurde der größte Teil der Untersuchungen an Portlandzementstein CEM I mit SRA1, SRA2, SRA3, W1 und W2 durchgeführt.

Da die in SRA3 enthaltenen Wirkstoffe mit den verwendeten Analyseverfahren qualitativ und quantitativ nachgewiesen werden konnten, wurde dieser Schwindreduzierer ausgewählt, um den Einfluss verschiedener Zemente auf das autogene Schwinden und die weiteren Eigenschaften von Zementleim und Zementstein zu untersuchen. Durch die getrennte Verwendung der in Schwindreduzierer SRA3 enthaltenen Wirkstoffe W1 und

W2 wurde in den Untersuchungen systematisch der Einfluss dieser beiden Wirkstoffsubstanzen auf die Eigenschaften von Zementleim und Zementstein erarbeitet.

5.1.2 Struktur und chemische Eigenschaften der SRA und Wirkstoffe

Die in den Untersuchungen verwendeten Schwindreduzierer und Wirkstoffe zählen zu den nichtionischen Tensiden. Sie sind durch einen hydrophob-hydrophilen Molekülaufbau gekennzeichnet. Der hydrophobe Molekülteil solcher Tenside besteht aus einer verzweigten oder unverzweigten Kohlenwasserstoff-Kette, an der eine oder mehrere hydrophile Gruppen gebunden sein können [Sch 72].

Die Struktur der Moleküle der Schwindreduzierer SRA1, SRA2 und SRA3 sowie der Wirkstoffe W1 und W2 sind schematisch in Tabelle 5-1 dargestellt. Für SRA2 ist eine Molekülstruktur dargestellt, die dem vom Hersteller angegebenen Hauptwirkstoff ähnlich ist. Die Methyl-Gruppen (CH_3) stellen jeweils die hydrophoben Molekülteile und die Hydroxyl-Gruppen (OH) die hydrophilen Molekülteile dar.

In Bild 5-1 ist schematisch die Wechselwirkung eines nichtionischen Tensids in Wasser und an der Grenzfläche Wasser/Luft am Beispiel des Wirkstoffs W2 dargestellt (vgl. Abschnitt 2.4.1). Durch das Herausdrängen der Wirkstoff-Moleküle aus dem Wasser wird die Oberflächenspannung herabgesetzt. Bei der kritischen Mizellbildungskonzentration agglomerieren die Moleküle zu Mizellen mit kugelförmiger Gestalt. Hierbei sind die hydrophoben Teile der Moleküle nach Innen gekehrt und werden durch eine hydrophile Schale vom Wasser abgeschirmt. Ist die kritische Mizellbildungskonzentration erreicht, ändert sich die Oberflächenspannung der wässrigen Lösung nicht mehr.

Tabelle 5-1 Chemische Struktur der Schwindreduzierer SRA1, SRA2 und SRA3 sowie der Wirkstoffe W1 und W2

SRA bzw. Wirkstoff	Schematische Molekülstruktur
1	2
W1	$\begin{array}{c} \text{H}_3\text{C} \quad \text{CH}_2 \quad \text{O} \quad \text{CH}_2 \quad \text{CH} \quad \text{CH}_3 \\ \quad \quad \quad \\ \text{CH} \quad \quad \quad \text{CH} \\ \quad \quad \quad \\ \text{OH} \quad \quad \quad \text{OH} \end{array}$
W2	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{CH} \quad \text{CH} \\ \quad \\ \text{CH}_2 \quad \text{CH}_2 \quad \text{O} \quad \text{C} \quad \text{CH}_3 \\ \quad \quad \quad \quad \quad \\ \text{HO} \quad \quad \quad \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array}$
SRA1	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{HO} - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{OH} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$
SRA2	$\text{H}_3\text{C} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{O} \left[\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{O} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \right]_n - \text{OH}$
SRA3	$= 50 \% \text{ W1} \quad \text{H}_3\text{C} - \text{CH}(\text{OH}) - \text{CH}_2 - \text{O} - \text{CH}_2 - \text{CH}(\text{OH}) - \text{CH}_3 + 50 \% \text{ W2} \quad \text{HO} - \text{CH}_2 - \text{CH}(\text{CH}_3) - \text{O} - \text{CH}(\text{CH}_3) - \text{CH}_2 - \text{O} - \text{C}(\text{CH}_3)_3$

1) Methyl-Gruppe, hydrophob
2) Hydroxyl-Gruppe, hydrophil

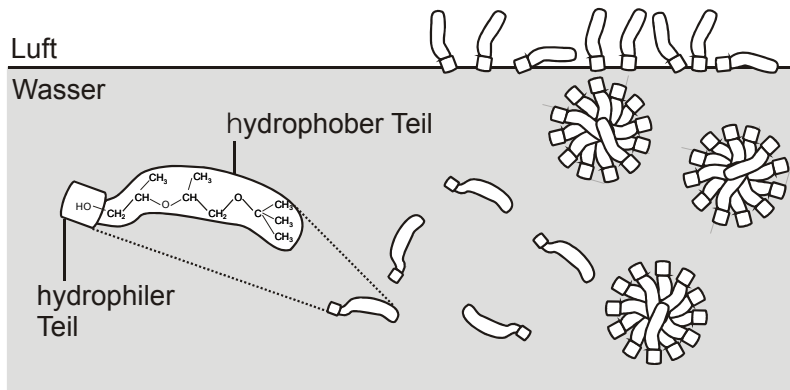


Bild 5-1 Schematische Darstellung der Wechselwirkung nichtionischer Tenside in Wasser und an der Grenzfläche Wasser/Luft am Beispiel des Wirkstoffs W2

5.1.3 Oberflächenspannung der wässrigen Lösung

Durch die Herabsetzung der Oberflächenspannung der Porenlösung von Zementstein wird nach [Sat 83] das Schwinden von Zementstein maßgeblich reduziert. Aus Untersuchungsergebnissen von [Ai 97, Ben 01a, Oha 88, Pea 05, Ron 05, Sug 98] geht hervor, dass die Oberflächenspannung des Zugabewassers durch SRA reduziert wird.

In einem ersten Arbeitsschritt wurde untersucht, in welchem Maße die ausgewählten Schwindreduzierer und Wirkstoffe die Oberflächenspannung von Wasser reduzieren.

Hierzu wurde die Oberflächenspannung an wässrigen Lösungen mit Zusatzmittel bzw. Wirkstoff-Konzentrationen zwischen 0 % und 100 % untersucht. Die Oberflächenspannung von Wasser beträgt bei 20 °C rd. 72,5 mN/m. In Bild 5-2 sind die Oberflächenspannungen in Abhängigkeit von der Zusatzmittelkonzentration relativ zur Oberflächenspannung von Wasser dargestellt.

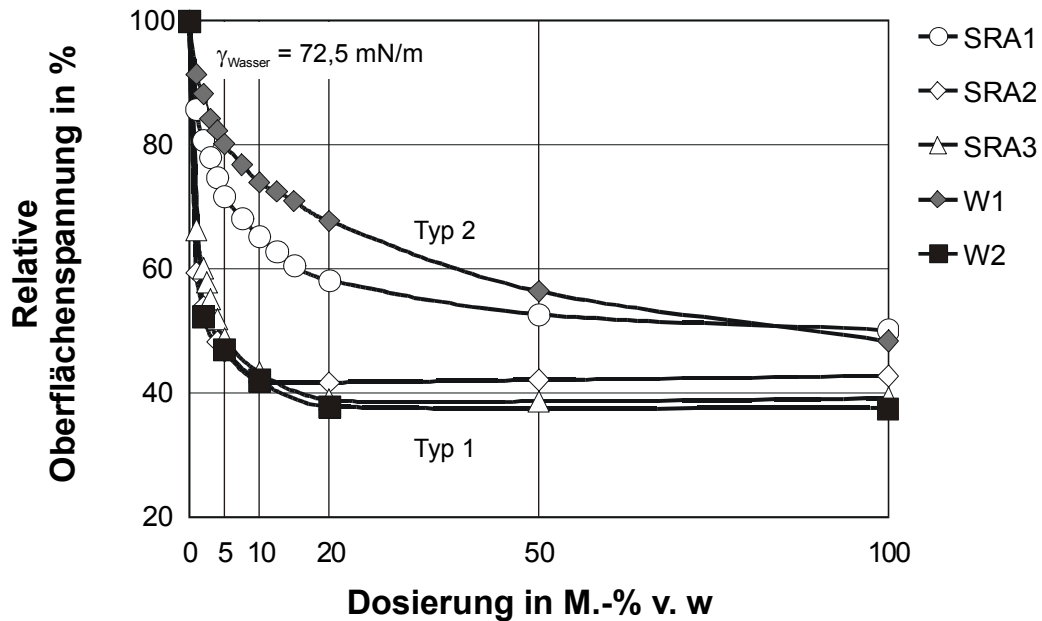


Bild 5-2 Relative Oberflächenspannung bezogen auf die von deionisiertem Wasser mit den Schwindreduzierern SRA1, SRA2, SRA3 und Wirkstoffen W1 und W2

Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten Schwindreduzierer und Wirkstoffe die Oberflächenspannung von deionisiertem Wasser herabsetzten. Dabei ließen sich die Zusatzmittel grob in zwei Gruppen einteilen.

Der ersten Gruppe „Typ 1“ wurden die Schwindreduzierer SRA2, SRA3 und der Wirkstoff W2 zugeordnet. Die Zusatzmittel dieser Gruppe reduzierten bereits bei sehr geringen Konzentrationen die Oberflächenspannung des Wassers sehr deutlich. Bereits Konzentrationen von rd. 3,5 bis 5 M.-% v. w reduzierten die Oberflächenspannung des Wassers um rd. 50 %. Darüber hinaus wurde bei dieser Gruppe festgestellt, dass ab einer Konzentration von rd. 10 bis rd. 20 M.-% v. w die Oberflächenspannung nicht weiter reduziert wurde. Die Lösung hatte bei dieser Dosierung die in Abschnitt 5.1.2 beschriebene kritische Mizellbildungskonzentration erreicht.

Der zweiten Gruppe „Typ 2“ wurden der Schwindreduzierer SRA1 und der Wirkstoff W1 zugeordnet. Durch die Zusatzmittel dieser Gruppe wurde die Oberflächenspannung von Wasser im Vergleich zu den Zusatzmitteln des „Typ 1“ weniger deutlich reduziert. Eine Reduzierung der Oberflächenspannung von Wasser um 50 % wurde erst mit Konzentrationen von 100 M.-% v. w festgestellt. Demnach wurde keine deutlich ausgeprägte kritische Mizellbildungskonzentration festgestellt. Dies ist auf die gute Löslichkeit der Moleküle in Wasser und die vergleichsweise geringe hydrophobe Wechselwirkung zurückzuführen. Eine einheitliche Absenkung der Oberflächenspannung des Zugabewassers bei gleicher SRA-Dosierung konnte deshalb nicht erreicht werden.

Zur Herstellung der Zementleime wurde eine Dosierung von 4,5 M.-% v. w gewählt. Dies entspricht für die Zusatzmittel der Gruppe „Typ 1“ (SRA3 und W2) einer Absenkung der Oberflächenspannung des Zugabewassers um rd. 50 % auf rd. 36,4 mN/m. Um

Zementleime mit vergleichbaren Dosierungen und vergleichbaren (Wasser+SRA)-Zement-Werten herzustellen, wurde die Dosierung von SRA2 und der Zusatzmittel der Gruppe „Typ 2“ (SRA1 und W1) an die der Gruppe „Typ 1“ angepasst und betrug ebenfalls 4,5 M.-% v. w (vgl. Abschnitt 4.1.2, Vorgehensweise zur Dosierung der Schwindreduzierer).

5.1.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Untersuchungsergebnisse zum Einfluss von SRA auf die Oberflächenspannung wässriger Lösungen bestätigten im Wesentlichen die in [Ai 97, Ben 01a, Oha 88, Pea 05, Ron 05, Sug 98] dargestellten Erkenntnisse.

Die Oberflächenspannung wässriger Lösungen wurde durch die Struktur der Wirkstoffe und die Wechselwirkung in Wasser beeinflusst. Bildlich gesehen werden durch die unpolaren hydrophoben Methylgruppen der SRA-Wirkstoffmoleküle die Wassermoleküle auseinander gedrängt und die Oberflächenspannung sinkt. Je mehr unpolare Gruppen in einem SRA-Molekül vorhanden sind und je höher die Konzentration dieser Moleküle in der wässrigen Lösung ist, desto niedriger ist die Oberflächenspannung.

Erwartungsgemäß senkten SRA2, SRA3 und W2 die Oberflächenspannung auf Grund ihres deutlich unpolaren Charakters am wirkungsvollsten. SRA1 reduzierte die Oberflächenspannung stärker als Wirkstoff W1, obwohl auf Grund der Molekülstruktur eine größere Löslichkeit sowie eine größere hydrophobe Wechselwirkung und somit eine geringere relative Oberflächenspannung zu erwarten war. Dies ist vermutlich auf Fremdmoleküle in dem handelsüblichen Schwindreduzierer zurückzuführen, die mit den verwendeten Analysemethoden nicht identifiziert werden konnten (s. Abschnitt 5.1.1).

Die Größe der einzelnen SRA-Moleküle liegt im Bereich weniger Ångström. Man kann aber davon ausgehen, dass durch die Bildung von Mizellen Agglomerate von einigen Nanometern (nm) entstehen können.

Um beurteilen zu können, ob die reduzierte Oberflächenspannung maßgebend für eine Schwindreduzierung von Zementstein ist, wurde in Abschnitt 5.3.2.1 untersucht, ob die Oberflächenspannung in der Porenlösung des erhärteten Zementsteins dauerhaft herabgesetzt wird.

5.2 Einfluss von SRA auf die Zementleimeigenschaften

5.2.1 Allgemeines

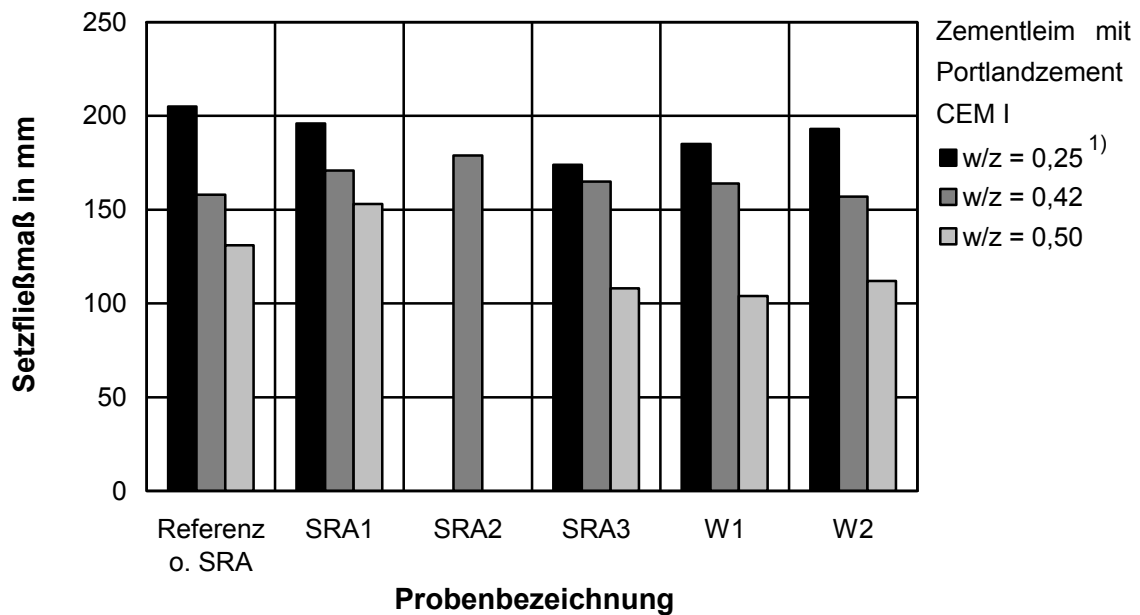
Im Folgenden werden die handelsüblichen schwindreduzierenden Zusatzmittel und die für die Untersuchungen verwendete Wirkstoffe als „SRA“ bezeichnet.

Es wurde der Einfluss der SRA auf die Konsistenz und den Luftgehalt untersucht. Durch SRA bedingte erhöhte Setzfließmaße können Hinweise auf eine bessere Dispergierung und auf eine dichtere Porenstruktur geben. Weiterhin können veränderte Luft-

gehalte der Zementleime ebenfalls ein Indikator für Veränderungen im Porengefüge sein.

5.2.2 Konsistenz

Die Ergebnisse der Konsistenzprüfungen der Zementleime mit Portlandzement CEM I mit dem in Abschnitt 4.3.3 beschriebenen Verfahren sind in Bild 5-3 zusammengefasst.



1) enthielt 0,58 M.-% v. z Fließmittel

Bild 5-3 Setzfließmaß von Zementleim mit Portlandzement CEM I in Abhängigkeit vom Wasserzementwert und vom verwendeten Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff

Zunächst wurde der Einfluss der SRA auf das Setzfließmaß bei unterschiedlichen Wasserzementwerten geprüft. Dabei zeigte sich, dass sich die Wirkung der SRA in Abhängigkeit vom Wasserzementwert unterscheidet.

w/z = 0,25:

Die Kombination aus Fließmittel und Schwindreduzierer, insbesondere mit Schwindreduzierer SRA3 führte gegenüber der Referenzprobe mit Fließmittel und ohne SRA zu einer geringfügig steiferen Konsistenz. Das Setzfließmaß des Zementleims verringerte sich durch die Zugabe von SRA um rd. 10 mm bis rd. 30 mm.

w/z = 0,42:

Durch die Schwindreduzierer SRA1, SRA2 wurde eine geringfügig verflüssigende Wirkung festgestellt. Das Setzfließmaß war um bis zu rd. 20 mm größer als bei der Referenzprobe ohne SRA. SRA3, W1 und W2 hatten keinen signifikanten Einfluss auf das Setzfließmaß.

$w/z = 0,50$:

Mit Schwindreduzierer SRA1 war das Setzfließmaß im Vergleich zur Referenz um rd. 20 mm größer. Mit SRA3, W1 und W2 wurde eine geringfügig steifere Konsistenz festgestellt. Das Setzfließmaß verringerte sich hierbei um rd. 20 mm. Es muss berücksichtigt werden, dass die Zementleime zuvor für 4 Stunden im Halbstundentakt aufgerührt wurden (siehe Abschnitt 4.2.1), um ein Absetzen des Zementleimes in der Schalung zu vermeiden.

Am Beispiel von SRA3, W1 und W2 wurde bei einem Wasserzementwert von $w/z = 0,42$ geprüft, wie sich die Wirkung der SRA in Abhängigkeit von der Zementart verändert. Die Ergebnisse sind Bild 5-4 zusammengefasst.

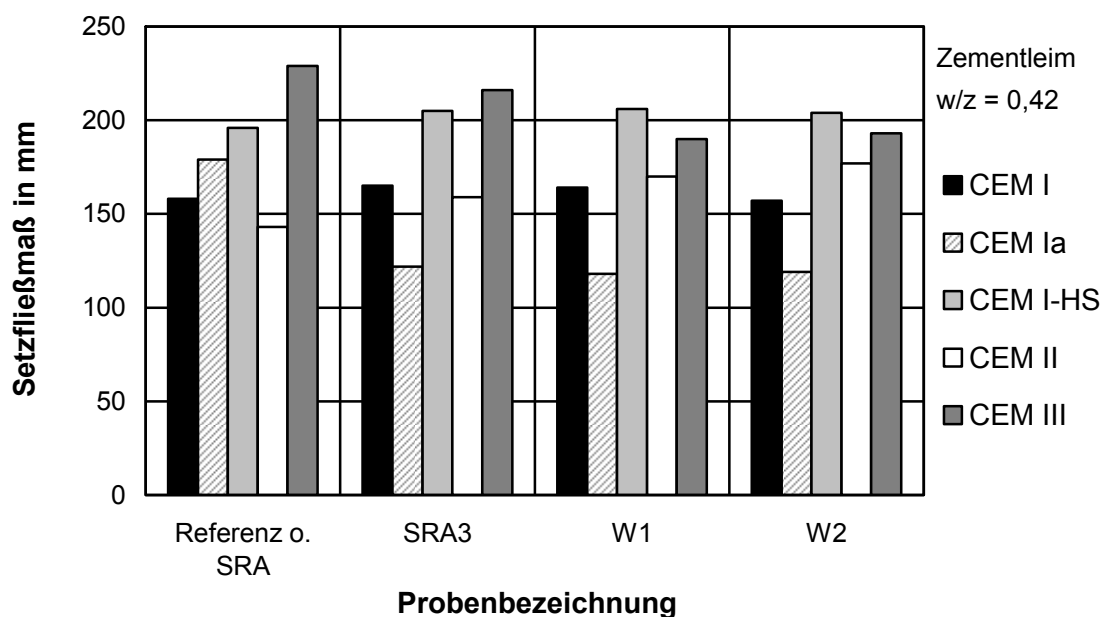


Bild 5-4 Setzfließmaß von Zementleim mit $w/z = 0,42$ in Abhängigkeit vom Zement und vom verwendeten Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff

Mit den Zementen CEM I-HS und CEM II wurde durch Zugabe der SRA eine leicht verflüssigende Wirkung festgestellt.

Der Zementleim aus dem mit KOH auf ein Na_2O -Äqu. = 1,20 M.-% aufdotierten Zement (CEM Ia) zeigte bei Verwendung der SRA ein um bis zu rd. 60 mm geringeres Setzfließmaß. Mit Hochofenzement CEM III wurde eine leichte Abnahme des Setzfließmaßes mit allen drei untersuchten SRA festgestellt.

Der Einfluss der Wirkstoffe W1 und W2 auf die Konsistenz der Zementleime in Abhängigkeit der Zementart bei einem Wasserzementwert $w/z = 0,25$ geht aus Bild 5-5 hervor.

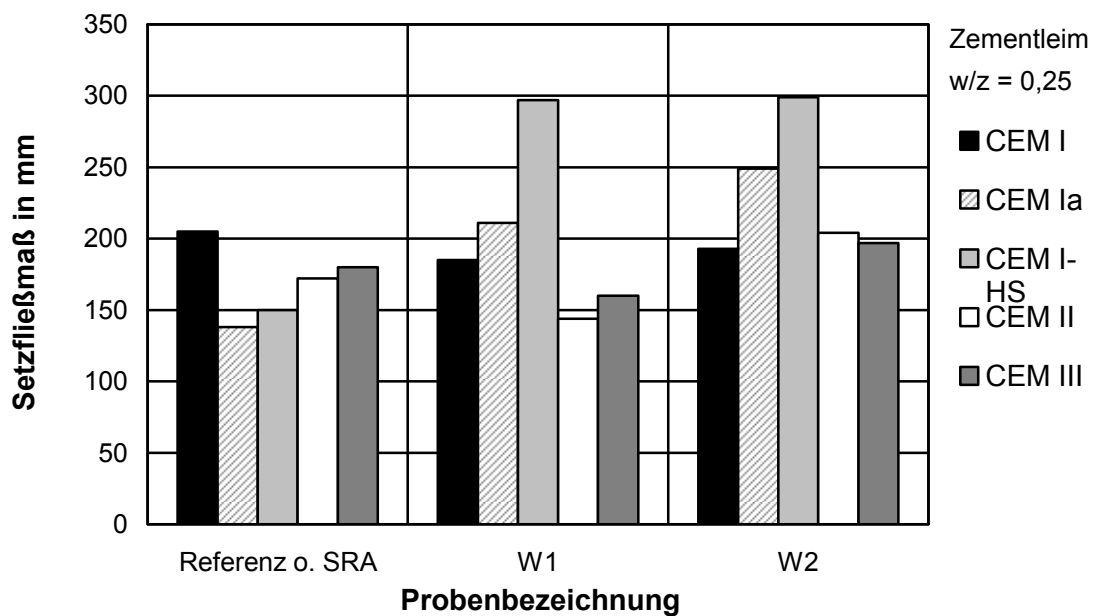


Bild 5-5 Setzfließmaß von Zementleim mit $w/z = 0,25$ in Abhängigkeit vom Zement und vom verwendeten Wirkstoff

Hierbei riefen die Wirkstoffe ein geringfügiges Ansteifen des Zementleims mit Portlandzement CEM I hervor. Im Gegensatz dazu vergrößerte sich das Setzfließmaß durch W1 und W2 im Vergleich zur Referenz bei Zementleim CEM Ia (Na_2O -Äqu. = 1,20 M.-%) und insbesondere bei Portlandzementleim mit CEM I-HS.

Bei den Zementleimen mit CEM II und CEM III führte die Dosierung des Wirkstoffs W1 zu einem geringen Konsistenzverlust. Mit Wirkstoff W2 dagegen erhöhte sich das Setzfließmaß geringfügig.

5.2.3 Luftgehalt

Parallel zu den Konsistenzmessungen wurde der Einfluss der SRA auf den Luftgehalt von Zementleim zunächst bei unterschiedlichen Wasserzementwerten mit CEM I geprüft. Die Luftgehalte sind in Tabelle A-7, Anhang A, dargestellt. Der jeweilige Luftgehalt der Leime war erwartungsgemäß gering.

Unabhängig vom Wasserzementwert hatten die SRA nur einen geringen Einfluss auf den Luftgehalt von Portlandzementleim CEM I.

Bei einem Wasserzementwert $w/z = 0,42$ wurde die Wirkung von SRA3, W1 und W2 in Abhängigkeit von der Zementart untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle A-8, Anhang A, dargestellt. Bis auf den Zementleim CEM Ia mit Wirkstoff W1 hatten die untersuchten SRA keinen signifikanten Einfluss auf den Luftgehalt der Zementleime.

5.2.4 Zusammenfassung

Die SRA beeinflussten die Konsistenz der Leime mit $w/z = 0,42$ nur geringfügig. Nur an den mit KOH aufdotierten Leimen (CEM Ia) wurde eine signifikante Abnahme des Setzfließmaßes durch SRA festgestellt.

Die Ergebnisse an Leimen mit unterschiedlichen Wasserzementwerten sind nur bedingt vergleichbar, da bei einem Wasserzementwert von $w/z = 0,25$ ein Fließmittel eingesetzt wurde und bei einem Wasserzementwert von $w/z = 0,50$ das Setzfließmaß erst vier Stunden nach Wasserzugabe ermittelt wurde.

In Zementleimen mit $w/z = 0,25$ führten die SRA bei gleichzeitiger Verwendung eines Fließmittels auf PCE-Basis zu teilweise signifikanten Abnahme des Setzfließmaßes. Dies könnte auf mögliche Wechselwirkungen mit dem Fließmittel zurückzuführen sein und bedarf weiterer Untersuchungen.

Diese sehr gegensätzlichen Wirkungen auf die Konsistenz werden auf mögliche Wechselwirkungen mit dem Fließmittel zurückgeführt.

Der Luftgehalt von Zementleim wurde bis auf eine Ausnahme (W1 in Zementleim mit CEM I und $w/z = 0,25$) durch die SRA nicht signifikant beeinflusst.

Weder der geringe Einfluss der SRA auf die Konsistenz noch auf den Luftgehalt der Zementleime lassen signifikante Veränderungen der Porosität erwarten.

5.3 Einfluss von SRA auf die Eigenschaften von Zementstein bei konservierenden Lagerungsbedingungen

5.3.1 Allgemeines

Zur Charakterisierung der Wirkungsweise von schwindreduzierenden Zusatzmitteln wurden Untersuchungen an Zementstein bei konservierenden Lagerungsbedingungen (L1) durchgeführt (s. Abschnitt 4.2.1). Durch die konservierenden Bedingungen wird der Zementstein nicht durch äußere Einflüsse, wie eine klimatisch bedingte Trocknung beeinflusst. Somit lassen sich die Einflüsse der SRA auf die Porenlösung, das Schwinden, die Entwicklung des Porengefüges und die innere relative Feuchte gezielt herausarbeiten und die Wirkungsmechanismen von SRA in Zementstein, insbesondere bezüglich des autogenen Schwindens, eingrenzen.

5.3.2 Einfluss auf die Porenlösung

5.3.2.1 Oberflächenspannung der Porenlösung

Sato et al. [Sat 83] beschrieben erstmals, dass die Oberflächenspannung des Kapillarporenwassers durch SRA um maximal 45 % herabgesetzt und somit das Schwinden von Zementstein und Beton reduziert wird. Untersuchungen zum Langzeitverhalten der Oberflächenspannung wurden nicht durchgeführt. In dieser Arbeit wurde der Einfluss

von SRA auf die Oberflächenspannung von Porenlösung aus Zementstein bis zu einem Alter von einem halben Jahr untersucht.

An der Porenlösung wurde die Oberflächenspannung mit dem in Abschnitt 4.3.2.2 beschriebenen Verfahren bestimmt und in Relation zu der Oberflächenspannung der Porenlösung eines Zementsteins ohne SRA, die der von deionisiertem Wasser entsprach, gesetzt.

Die Oberflächenspannung von deionisiertem Wasser betrug bei 20 °C rd. 72,5 mN/m. Die Oberflächenspannung der jeweiligen Porenlösung der Referenzzementsteine ohne SRA unterschied sich davon nicht wesentlich, da die gelösten Bestandteile in der Porenlösung (Ca^{2+} -, Na^{+} -, K^{+} -, SO_4^{2-} -Ionen) die Oberflächenspannung nicht signifikant beeinflussten.

Der zeitliche Verlauf der relativen Oberflächenspannung von Porenlösung aus Zementstein mit $w/z = 0,42$ mit Portlandzement CEM I ist in Bild 5-6 dargestellt. Zum Zeitpunkt 0 wurde die relative Oberflächenspannung des Zugabewasser-SRA-Gemisches herangezogen (siehe Spalte 7, Tabelle A-3, Anhang A). Innerhalb von 28 Tagen nahm die relative Oberflächenspannung der Porenlösung ab und veränderte sich dann nur noch geringfügig. Die Oberflächenspannungen ab einem Alter von 28 Tagen entsprachen denen der wässrigen Lösungen der jeweiligen SRA mit einer Konzentration von rd. 15 bis rd. 20 M.-% v. w (vgl. Bild 5-2).

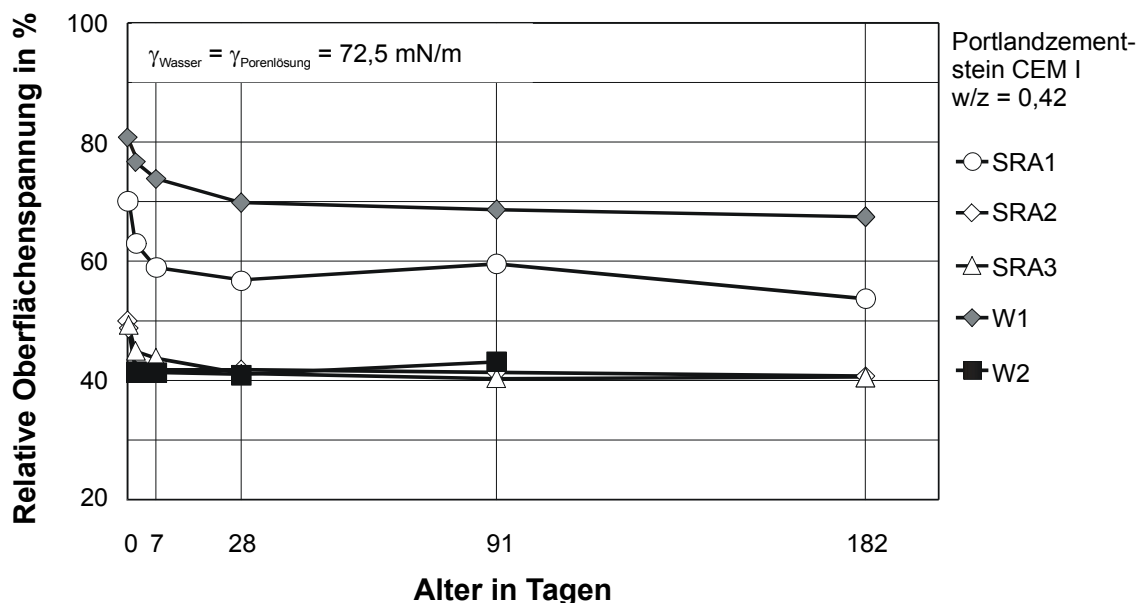


Bild 5-6 Relative Oberflächenspannung der Porenlösung von Portlandzementstein CEM I mit $w/z = 0,42$ mit den Schwindreduzierern SRA1, SRA2, SRA3 sowie den Wirkstoffen W1 und W2 bezogen auf die Referenz ohne SRA; Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA2: 3,5 M.-% v. w)

Der Verlauf der relativen Oberflächenspannung veränderte sich auch bei einer Erhöhung des Wasserzementwerts auf $w/z = 0,50$ nicht wesentlich (s. Bild B-7, Anhang B).

Am Beispiel von SRA3 wurde untersucht, ob sich der Einfluss des SRA auf die Oberflächenspannung der Porenlösung in Abhängigkeit von der Zementart verändert. Aus Bild B-8, Anhang B, geht hervor, dass die relative Oberflächenspannung der Porenlösung unabhängig von der Zementart über einen Zeitraum von einem halben Jahr nahezu identisch war. Lediglich im Verlauf bis zu einem Alter von 28 Tagen gab es geringe Unterschiede.

5.3.2.2 SRA-Konzentration in der Porenlösung

Bei Erreichen der kritischen Mizellbildungskonzentration an SRA (rd. 10 bis 20 M.-% v. w, vgl. Bild 5-2) kann nicht mehr direkt von der Oberflächenspannung auf die Konzentration der SRA-Moleküle in der Porenlösung geschlossen werden. Um die SRA-Konzentration zu bestimmen, wurde an Porenlösung der TOC-Gehalt nach dem in Abschnitt 4.3.2.3 beschriebenen Verfahren bestimmt. Hierbei traten teilweise starke Schwankungen auf. Dies war unter anderem dadurch bedingt, dass beim Auspressen, besonders ab einem Alter von 28 Tagen, nur sehr geringe Mengen an Porenlösung aus dem Zementstein gewonnen werden konnte, wodurch die TOC-Bestimmung erschwert wurde.

Aus Bild 5-7 geht hervor, dass die Schwindreduzierer und Wirkstoffe in der Porenlösung gelöst vorlagen und kaum an Zement oder Hydratphasen sorbiert wurden. Die jeweilige Konzentration von SRA1, SRA3 und W1 in der Porenlösung nahm bis zum Alter von 14 Tagen zu und erreichte eine Konzentration von rd. 15 %. Bis zu einem Alter von einem Jahr stieg sie auf rd. 16 % bis rd. 20 % an. In der Porenlösung mit SRA2 betrug die Konzentration im Alter von sieben Tagen rd. 14 % und stieg bis zu einem Alter von einem Jahr nur noch geringfügig an, wobei sie aber geringen Schwankungen unterlag.

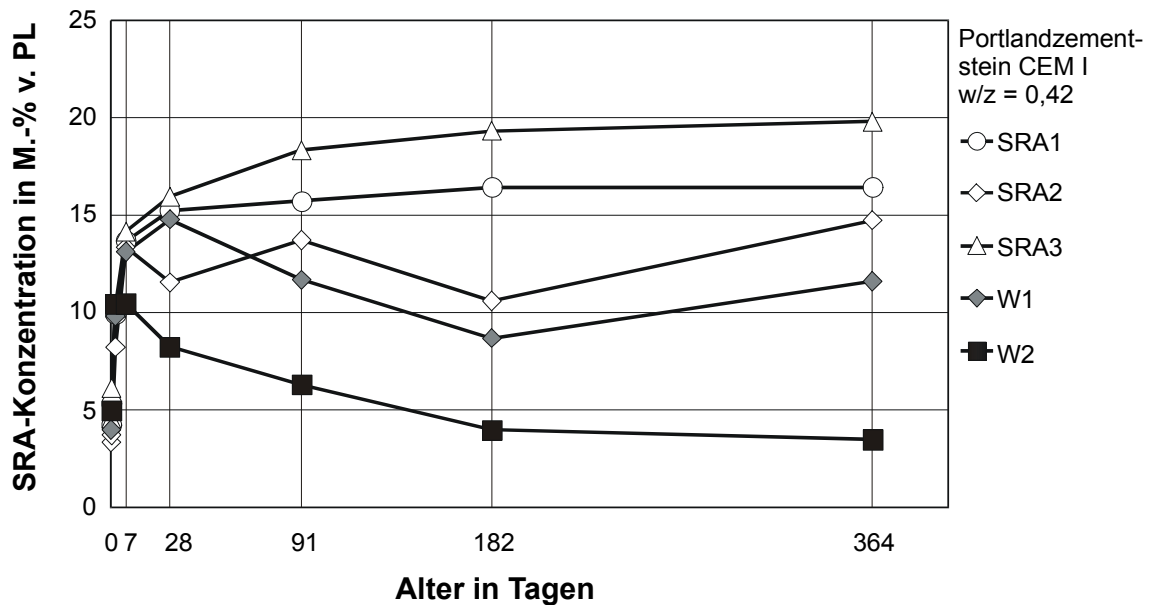


Bild 5-7 SRA-Gehalte der Porenlösung von Portlandzementstein CEM I mit $w/z = 0,42$ und den Schwindreduzierern SRA1, SRA2, SRA3 sowie den Wirkstoffen W1 und W2, Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA2 3,5 M.-% v. w)

Diese Zunahme der Konzentration wurde auf die Einbindung von Wasser in Hydratationsprodukte zurückgeführt, wobei der Großteil der Schwindreduzierer offensichtlich kaum an Zement oder dessen Reaktionsprodukten sorbiert wurde und in der Porenlösung verblieb.

Im Gegensatz dazu nahm die SRA-Konzentration von Wirkstoff W2 in der Porenlösung ab einem Alter von sieben Tagen kontinuierlich ab. Die kritische Mizellbildungskonzentration dieses Wirkstoffs in wässriger Lösung lag bei rd. 2,5 %. Dies deutet darauf hin, dass mit fortschreitender Hydratation zunehmend Moleküle zu Assoziaten agglomerieren und die Mizellen durch eine Gefügeverdichtung im Zementsteingefüge eingelagert wurden. Eine Sorption der Moleküle in Zementstein erscheint auf Grund der Vielzahl von unpolaren Endgruppen unwahrscheinlich.

Die ermittelten SRA-Gehalte stehen in guter Übereinstimmung mit den ermittelten relativen Oberflächenspannungen der Porenlösung (vgl. Bild 5-2 und Bild 5-6). Nur im Fall des Wirkstoffs W2 lag die SRA-Konzentration zu jedem Zeitpunkt über der kritischen Mizellbildungskonzentration, so dass anhand der ermittelten Oberflächenspannung der Porenlösung nicht auf die abnehmende Konzentration des Wirkstoffs in der Porenlösung geschlossen werden konnte.

Der Gehalt von Schwindreduzierer SRA3 in der Porenlösung von Zementstein aus den Zementen CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III war erwartungsgemäß mit den Gehalten in der Porenlösung von Zementstein aus Portlandzement CEM I vergleichbar (s. Bild B-9, Anhang B). Bei allen Zementen stieg die Konzentration von SRA3 bis zu

einem Alter von 28 Tagen auf rd. 16 % bis rd. 19 % an. Danach änderte sich die Konzentration in der Porenlösung der verschiedenen Zementsteine nicht mehr signifikant.

5.3.2.3 Alkaliionenkonzentration in der Porenlösung

Die Konzentration der Natrium- und Kaliumionen in der Porenlösung wurde zu einer Alkaliionenkonzentration zusammengefasst. Der Alkaliionenkonzentration in der Porenlösung von Zementstein CEM I ist in Bild B-10, Anhang B, in Relation zur Referenzprobe ohne SRA dargestellt.

Durch die Schwindreduzierer SRA1 bis SRA3 verringerte sich die Konzentration der Alkaliionen in der Porenlösung dauerhaft um rd. 10 % (SRA3) bis rd. 25 % (SRA2) in Relation zur Referenzprobe. Im Gegensatz dazu führte die Zugabe des Wirkstoffs W1 zu einem Anstieg der Alkaliionenkonzentration in der Porenlösung um bis zu rd. 18 %. Der Wirkstoff W2 hatte nur einen geringen Einfluss auf die Alkaliionenkonzentration der Porenlösung.

Der Einfluss von SRA3 auf die Alkaliionenkonzentration in der Porenlösung von Zementstein verschiedener Zemente ist in Bild B-11, Anhang B, dargestellt. Ähnlich wie bei Porenlösung aus Zementstein mit Portlandzement CEM I wurde auch in der Porenlösung der Zementsteine mit CEM Ia, CEM I-HS und CEM III durch den Schwindreduzierer SRA3 die Alkaliionenkonzentration in der Porenlösung in Relation zur jeweiligen Referenzprobe bis auf CEM II reduziert. Die Abnahme der Alkaliionenkonzentration betrug maximal rd. 10 % bis rd. 30 %.

Möglicherweise können durch die Moleküle der SRA die thermodynamischen Zustandsgrößen und die Wasserstruktur geändert werden [Sch 72]. Dies kann zu einer veränderten Löslichkeit von Alkalisalzen in der Porenlösung führen [Raj 08].

5.3.2.4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen an Porenlösung von Zementstein verschiedener Zemente zeigten, dass die Oberflächenspannung der Porenlösung von Zementstein dauerhaft durch die gewählten Schwindreduzierer und Wirkstoffe herabgesetzt wurde. Im Alter von 28 Tagen entsprachen die jeweiligen Oberflächenspannungen in etwa den Oberflächenspannungen der entsprechenden wässrigen Lösungen. Demnach hatten die in der Porenlösung gelösten Ionen keinen signifikanten Einfluss auf die Oberflächenspannung. Über das Alter von 28 Tagen hinaus veränderte sich die relative Oberflächenspannung der Porenlösung unabhängig vom jeweiligen verwendeten Schwindreduzierer, vom Wasserzementwert und von der Zementart nicht mehr wesentlich.

Die SRA-Konzentration in der Porenlösung von konserviert gelagerten Zementsteinen stieg bis zu einem Alter von einem Jahr auf bis zu rd. 15 % bis rd. 20 % bezogen auf die Porenlösung unabhängig von der Zementart an. Diese Zunahme der Konzentration wurde auf die Einbindung von Wasser in Hydratationsprodukte zurückgeführt, wobei der Großteil der Schwindreduzierer offensichtlich kaum an Zement oder dessen Reaktionsprodukten sorbiert wurde. Dies führte mit zunehmendem Hydratationsfortschritt zu ei-

ner Abnahme der freien Wassermenge im Porengefüge und somit zu einem Anstieg der SRA-Konzentration in der Porenlösung.

Die sukzessive Abnahme der Konzentration von Wirkstoff von W2 in der Porenlösung von Zementstein mit Portlandzement CEM I wird auf eine zunehmende Mizellbildung und deren Einlagerung im Zementsteingefüge zurückgeführt (vgl. Abschnitt 5.1.2).

Die veränderte Alkaliionenkonzentration in der Porenlösung kann möglicherweise auf Strukturänderungen des Wassers durch SRA-Moleküle und die damit veränderte Löslichkeit von Alkalisalzen zurückgeführt werden.

5.3.3 Autogenes Schwinden von Zementstein

5.3.3.1 Allgemeines

Das autogene Schwinden von Zementstein wurde in speziell entwickelten Apparaturen gemessen, die es ermöglichten, die Längenänderungen von Zementstein bereits im Alter von sechs Stunden zuverlässig und reproduzierbar zu bestimmen (vgl. Abschnitt 4.3.4.2). Bei Zementstein mit Wasserzementwerten $w/z = 0,25$ und $w/z = 0,42$ wurden die Messungen sechs Stunden nach Herstellung begonnen, bei Zementstein mit $w/z = 0,50$ nach acht Stunden. Die Auswertung der autogenen Schwindverformungen erfolgte ab dem jeweiligen Zeitpunkt t_0 (s. Tabelle 4-3, Abschnitt 4.3.4.2).

5.3.3.2 Zementstein ohne schwindreduzierende Zusatzmittel

Zunächst wurden die autogenen Schwindverformungen von Zementstein bis zu einem Alter von 182 Tagen ohne schwindreduzierende Zusatzmittel untersucht. Aus Bild 5-8 bzw. Bild 5-9 gehen die zeitlichen Verläufe der autogenen Schwindverformungen der Zementsteine mit CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III mit $w/z = 0,42$ bzw. $w/z = 0,25$ hervor. Das autogene Schwinden von Portlandzementstein CEM I mit $w/z = 0,50$ ist im oberen Teil von Bild 5-12 dargestellt.

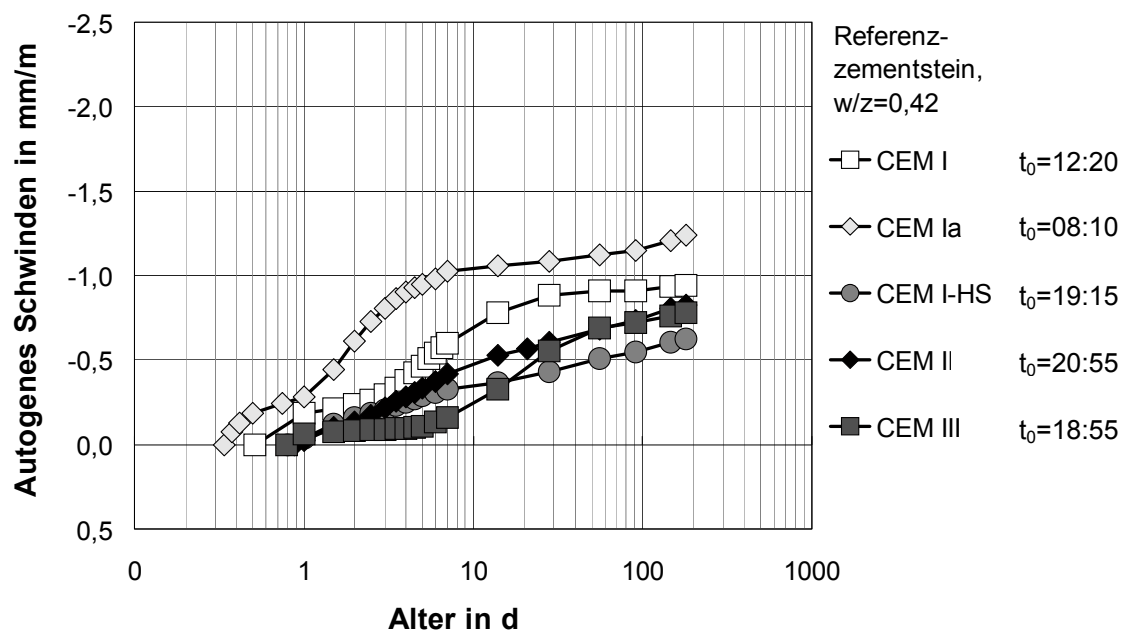


Bild 5-8 Autogenes Schwinden der Zementsteine CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III mit $w/z = 0,42$ ohne SRA

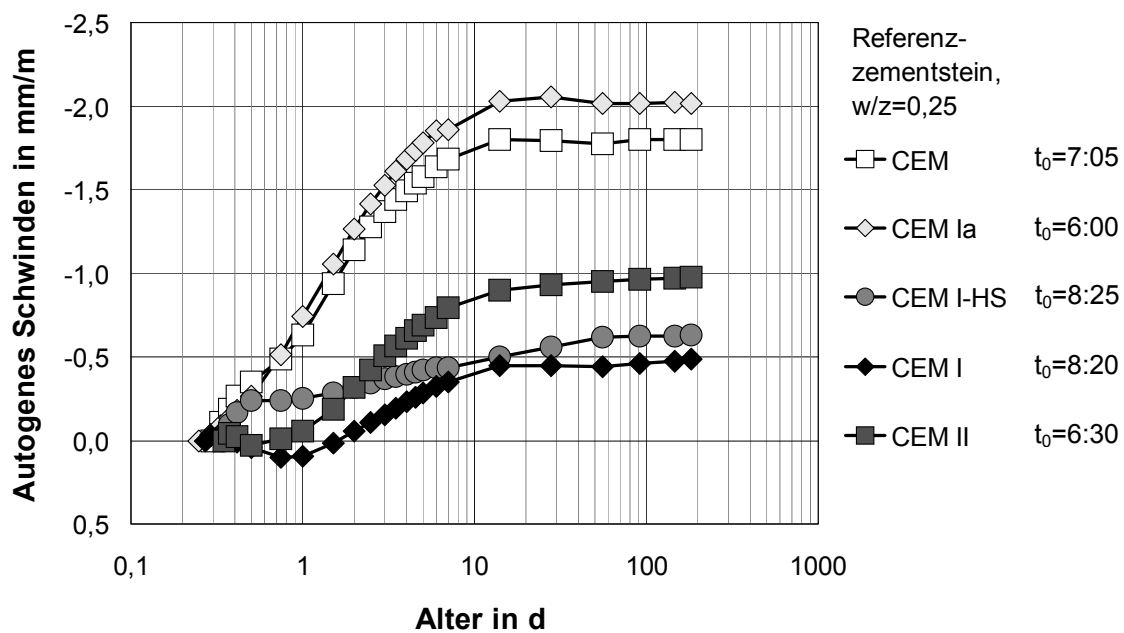


Bild 5-9 Autogenes Schwinden der Zementsteine CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III mit $w/z = 0,25$ ohne SRA

Erwartungsgemäß waren die autogenen Schwinddehnungen der untersuchten Zementsteine bei $w/z = 0,25$ größer als bei $w/z = 0,42$ und $w/z = 0,50$ (s. Bild 5-12). Entgegen

den Erwartungen war die autogene Schwinddehnung von Portlandkalksteinzementstein CEM II mit $w/z = 0,42$ um rd. 0,3 mm/m größer als mit $w/z = 0,25$. Möglicherweise wurde durch die dispergierende Wirkung des Fließmittels in Zementstein mit $w/z = 0,25$ die Agglomerate des Kalksteinmehls vermehrt aufgeschlossen und trugen zur Hohlraumfüllung bei. Dadurch wurde die Verformung des Zementsteins behindert.

Unabhängig vom Wasserzementwert zeigten die mit C_3A -reichem Portlandzement hergestellten Zementsteine CEM I die höchsten Schwinddehnungen. Die Schwinddehnungen wurden dabei durch die Aufdotierung mit KOH (CEM Ia) noch verstärkt und erreichten ein Maximum von rd. 2,0 mm/m ($w/z = 0,25$) und rd. 1,2 mm/m ($w/z = 0,42$). Bei einer Erhöhung des Wasserzementwerts auf $w/z = 0,50$ wurde die Schwindverformung des Zementsteins CEM I im Vergleich zu $w/z = 0,42$ um rd. 0,3 mm/m verringert.

Die Schwinddehnungen der Zementsteine mit HS-Portlandzement (CEM I-HS) bzw. mit Portlandkalksteinzement CEM II und Hochofenzement CEM III waren um mehr als 50 % ($w/z = 0,25$) bzw. 20 % bis 40 % ($w/z = 0,42$) geringer als die der Zementsteine mit Portlandzement CEM I und CEM Ia. Dies ist auf den geringeren C_3A -Gehalt des HS-Portlandzements CEM I-HS sowie auf den Kalksteinanteil des Portlandkalksteinzements bzw. den Hüttensandanteil des Hochofenzements zurückzuführen.

Die autogenen Schwindverformungen waren bei $w/z = 0,25$ bei CEM I und CEM Ia im Alter von rd. 14 Tagen und bei den übrigen Zementen im Alter von 91 Tagen im Wesentlichen abgeschlossen. Bei $w/z = 0,42$ wurden im Alter von 182 Tagen teilweise noch sehr deutliche autogene Schwindverformungen der Zementsteine ermittelt.

5.3.3.3 Zementstein mit SRA

Das autogene Schwinden von Zementstein wurde mit Portlandzement CEM I mit Wasserzementwerten von $w/z = 0,25$, $w/z = 0,42$ und $w/z = 0,50$ mit SRA1 (nur $w/z = 0,25$ und $w/z = 0,42$), SRA2 (nur $w/z = 0,42$), SRA3 (nur $w/z = 0,25$ und $w/z = 0,42$), W1 und W2 untersucht.

Die schwindreduzierende Wirkung von SRA3, W1 und W2 wurde an Zementsteinen aus CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III mit $w/z = 0,42$ (SRA3, W1 und W2) und $w/z = 0,25$ (W1 und W2) untersucht.

Im Folgenden wird die Wirkung der SRA auf das autogene Schwinden von Zementstein als relatives Schwinden bezogen auf die jeweiligen Zementsteinprismen ohne SRA dargestellt und im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Schwindreduzierung (SR) bezeichnet. Dabei wurde erstmalig 24 Stunden ($w/z = 0,42$) bzw. 12 Stunden ($w/z = 0,25$) nach Herstellung, die Schwinddehnung von Zementsteinproben mit SRA nach folgender Gleichung in Relation zur Schwinddehnung der jeweiligen Referenzprobe ohne SRA gesetzt:

$$SR = \left(1 - \frac{\varepsilon_{SRA}}{\varepsilon_{REF}} \right) \cdot 100\%$$

Gleichung 5

mit:

SR : Schwindreduzierung [%] (relatives Schwinden bezogen auf die entsprechende Referenzprobe ohne SRA)

ε_{SRA} : Schwinddehnung einer Probe mit Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff [mm/m]

ε_{REF} : Schwinddehnung der entsprechenden Referenzprobe ohne SRA [mm/m]

Durch die Betrachtung der Schwindverformung von Zementstein mit SRA in Relation zur jeweiligen Referenzprobe ohne SRA konnte zum Einen eine Unterscheidung der Wirkung verschiedener Schwindreduzierer und Wirkstoffe herausgearbeitet werden. Zum Anderen war dadurch auch ein direkter Vergleich der schwindreduzierenden Wirkung verschiedener SRA bzw. deren Wirkstoffe in Zementsteinen mit unterschiedlichen Zementen und Wasserzementwerten möglich.

5.3.3.4 SRA und Portlandzementstein CEM I

Die Zeitpunkte t_0 , ab denen das spannungsinduzierende autogene Schwinden berücksichtigt wurde, verzögerten sich durch die Schwindreduzierer und Wirkstoffe im Vergleich zur Referenzprobe um bis rd. 9,5 Stunden (s. Bild 5-10 (oben)).

In Bild 5-10 (unten) ist die schwindreduzierende Wirkung der Schwindreduzierer (SRA1, SRA2, SRA3) und Wirkstoffe (W1 und W2) in Portlandzementstein CEM I mit $w/z = 0,42$ ab einem Alter von 24 Stunden dargestellt. Da die Wirkung der SRA, besonders im jungen Alter, sehr verschieden war, wurde im Folgenden eine qualitative Einteilung der Wirkung vorgenommen.

Im jungen Alter bis zu drei Tagen zeigte Wirkstoff W2 die größte schwindreduzierende Wirkung. Der Verlauf der Schwindreduzierung ließ sich dabei durch zwei Phasen charakterisieren:

1. Phase: Abnahme der Schwindreduzierung zwischen 24 Stunden und fünf Tagen
2. Phase: Darüber hinaus nahezu konstant bleibende Wirkung bis zu einem Alter von 182 Tagen (Messende)

Durch die Schwindreduzierer SRA1 und SRA2 wurde eine ähnliche Wirkung in Zementstein hervorgerufen, die qualitativ wie folgt beschrieben werden kann:

1. Phase: Abnahme der Schwindreduzierung zwischen 24 und 36 Stunden
2. Phase: Leichte Zunahme der Schwindreduzierung bis zu einem Alter von rd. fünf Tagen
3. Phase: Ab einem Alter von rd. fünf Tagen kontinuierliche Abnahme der Schwindreduzierung bis zu einem Alter von 182 Tagen (Messende).

Die Wirkung von SRA3 und W1 war weitgehend ähnlich und ließ sich wie folgt charakterisieren:

1. Phase: Zunahme der Schwindreduzierung bis zu einem Alter von rd. sieben Tagen
2. Phase: Abnahme der Schwindreduzierung bis zu einem Alter von 28 Tagen
3. Phase: Nach 28 Tagen nahezu konstant bleibende Wirkung bis zu einem Alter von 182 Tagen (Messende)

Bei SRA3, W1 und W2 war die Langzeitwirkung über das Alter von rd. 28 Tagen hinaus in etwa gleich und blieb bis zum Alter von 182 Tagen nahezu konstant. Bei SRA1 und SRA2 dagegen ließ die schwindreduzierende Wirkung kontinuierlich nach.

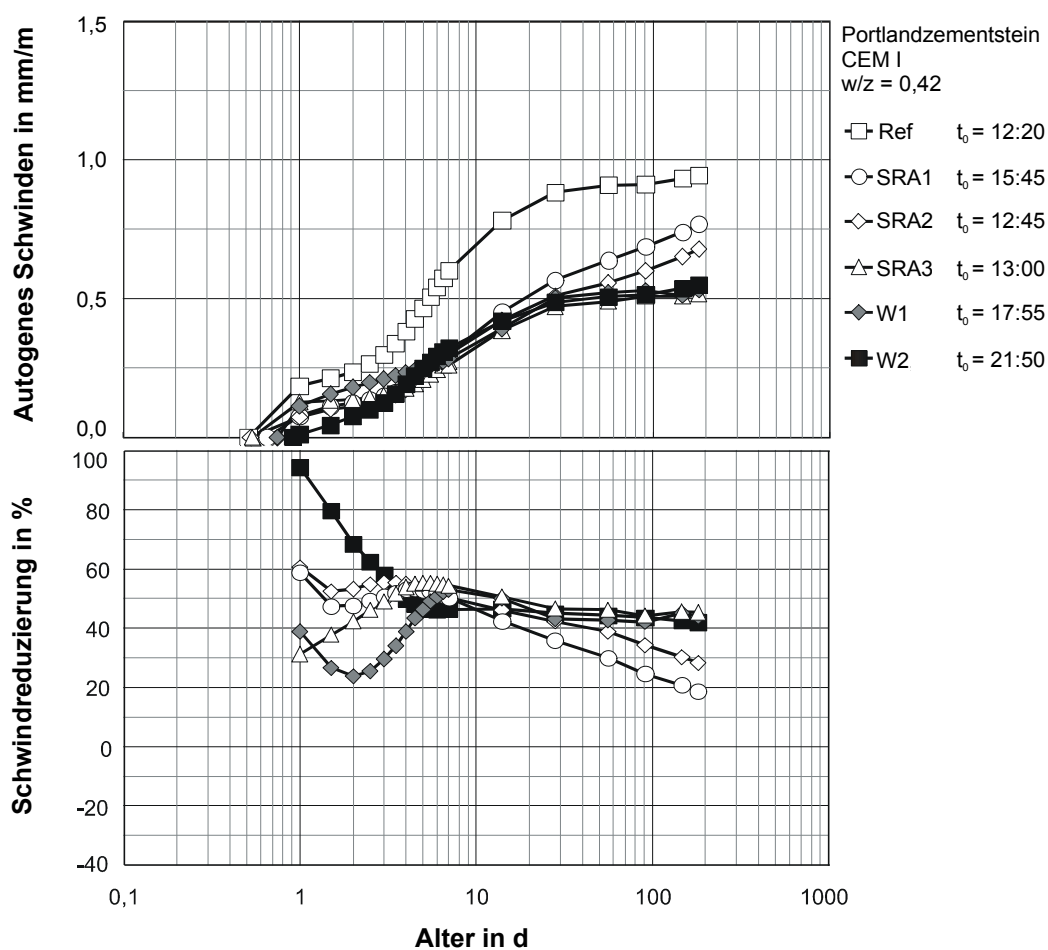


Bild 5-10 Autogenes Schwinden (oben) und Schwindreduzierung (unten) von Portlandzementstein CEM I mit $w/z = 0,42$ und mit den Schwindreduzierern SRA1 bis SRA3 sowie den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w; Dosierung SRA2: 3,5 M.-% v. w

In Bild 5-11 sind das autogene Schwinden sowie die Schwindreduzierung von Zementstein aus CEM I mit SRA1, SRA2, SRA3, W1 und W2 mit einem Wasserzementwert

$w/z = 0,25$ dargestellt. Aus Bild 5-12 gehen die autogenen Schwindverformungen und die Schwindreduzierung von Zementstein mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,50$ mit den Wirkstoffen W1 und W2 hervor.

Wirkstoff W2 wies jeweils die größte schwindreduzierende Wirkung auf. Der Verlauf war mit $w/z = 0,25$ und mit $w/z = 0,50$ ähnlich und qualitativ mit dem Verlauf der Wirkung mit $w/z = 0,42$ vergleichbar. Mit Schwindreduzierer SRA3 wurde bei $w/z = 0,25$ ein ähnlicher Verlauf wie bei W2 festgestellt. Es wurden hierbei zwei Phasen unterschieden:

1. Phase: Abnahme der Schwindreduzierung bis zu einem Alter von 56 Tagen
2. Phase: darüber hinaus jeweils nahezu konstant bleibende Wirkung bis zu einem Alter von 182 Tagen (Messende)

Mit Wirkstoff W1 war der Verlauf der Schwindreduzierung mit $w/z = 0,25$ und $w/z = 0,50$ ähnlich und qualitativ mit $w/z = 0,42$ vergleichbar. Es wurden drei Phasen unterschieden:

1. Phase: ausgehend von einer geringen Schwindreduzierung Zunahme der Schwindreduzierung mit $w/z = 0,25$ bzw. $w/z = 0,50$ bis zu einem Alter von 2 Tagen bzw. 14 Tagen
2. Phase: Abnahme der Schwindreduzierung mit $w/z = 0,25$ bzw. $w/z = 0,50$ bis zu einem Alter von 28 Tagen bzw. 91 Tagen
3. Phase: darüber hinaus jeweils nahezu konstant bleibende Wirkung bis zu einem Alter von 182 Tagen (Messende)

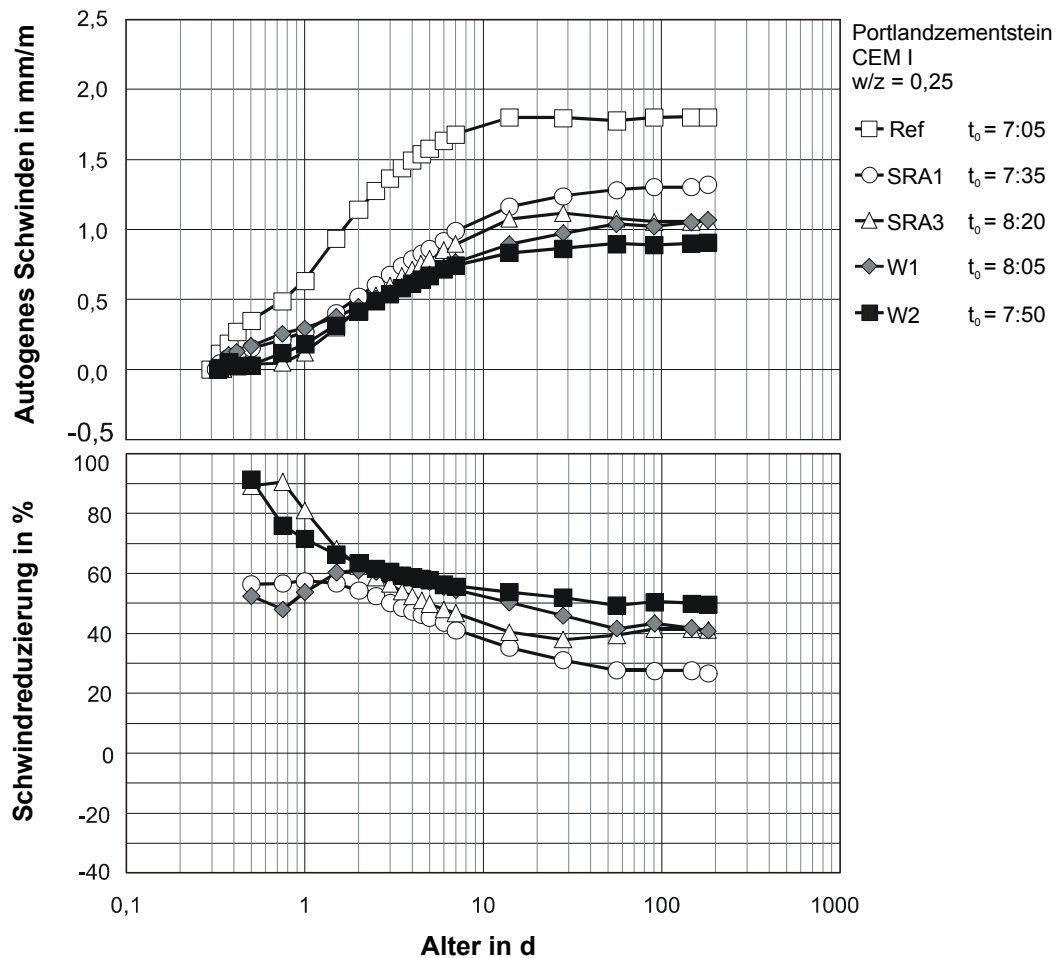


Bild 5-11 Autogenes Schwinden (oben) und Schwindreduzierung (unten) von Portlandzementstein CEM I mit $w/z = 0,25$ und den Schwindreduzierern SRA1, SRA3 sowie den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

Mit SRA1 wurde bei $w/z = 0,25$ die geringste schwindreduzierende Wirkung ermittelt. Ab einem Alter von 36 Stunden wurde hierbei eine nahezu kontinuierliche Abnahme der Schwindreduzierung festgestellt. Nach 182 Tagen war die Schwindreduzierung rd. 10 % geringer als bei SRA3, W1 und rd. 22 % geringer als bei Portlandzementstein mit W2.

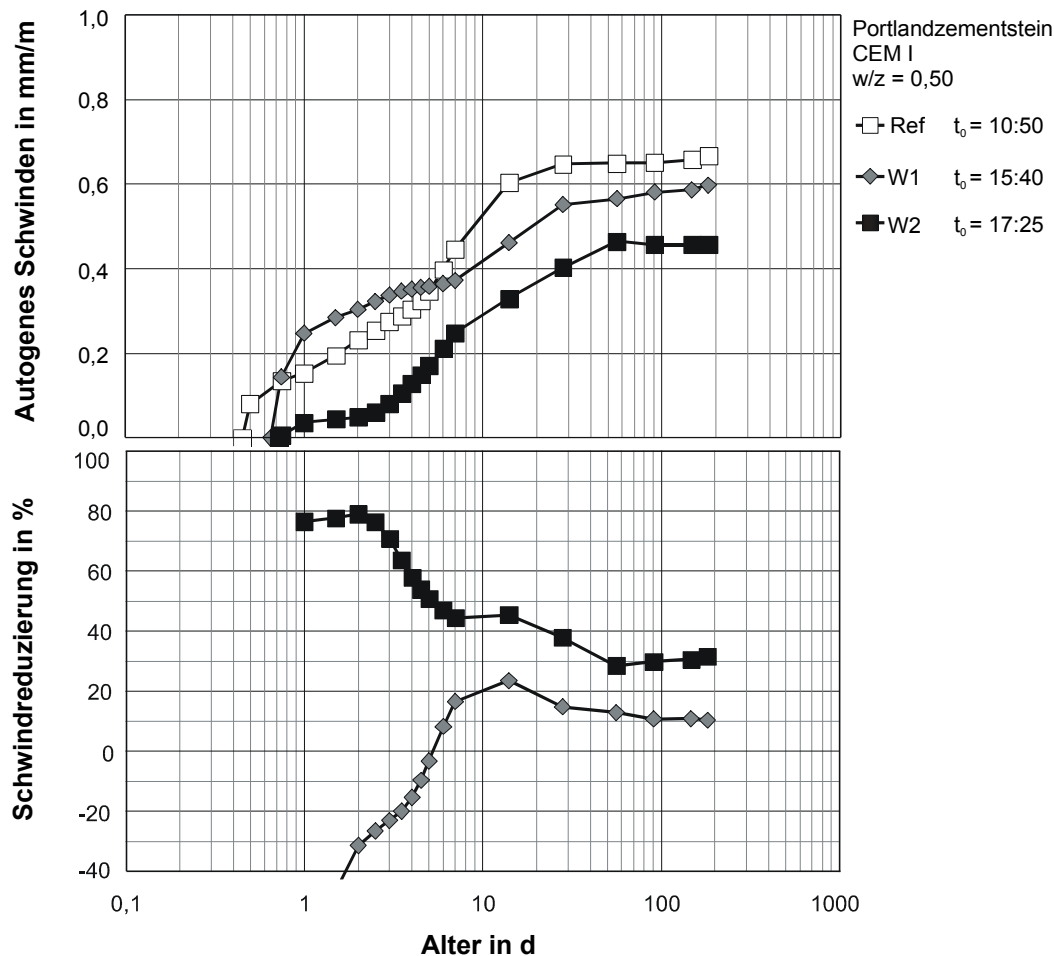


Bild 5-12 Autogenes Schwinden (oben) und Schwindreduzierung (unten) von Portlandzementstein CEM I mit $w/z = 0,50$ und den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

Der Einfluss des Wasserzementwerts auf die Schwindreduzierung von Portlandzementstein CEM I im Alter von 182 Tagen ist in Bild 5-13 zusammengefasst. Aus dem Bild geht hervor, dass die Wirkung insbesondere in Zementstein mit $w/z = 0,50$ nachließ. Mit Schwindreduzierer SRA1 wurde erwartungsgemäß die jeweils geringste schwindreduzierende Wirkung bei $w/z = 0,42$ und $w/z = 0,25$ bestimmt. Das ist wahrscheinlich auf die hohe relative Oberflächenspannung und somit die geringere unpolare Wechselwirkung mit der Porenlösung zurückzuführen. Die vergleichsweise gute Wirkung von W1 in Zementstein mit Wasserzementwerten von $w/z = 0,42$ und $w/z = 0,25$ entsprach dagegen auf Grund der ebenfalls hohen relativen Oberflächenspannung nicht den Erwartungen.

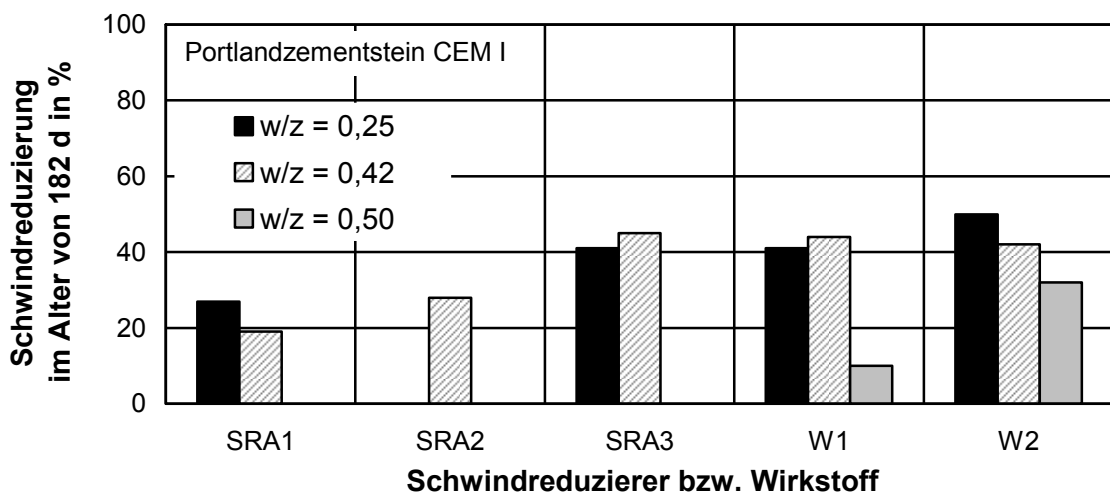


Bild 5-13 Reduzierung des autogenen Schwindens von Portlandzementstein CEM I im Alter von 182 Tagen; Dosierung: 4,5 M.-% v. w; Dosierung SRA2: 3,5 M.-% v. w

5.3.3.5 SRA und Portlandzementstein CEM Ia

In Bild B-12, Anhang B, sind das autogene Schwinden (oben) und die schwindreduzierende Wirkung (unten) des Schwindreduzierers SRA3 und der Wirkstoffe W1 und W2 in Portlandzementstein CEM Ia mit $w/z = 0,42$ dargestellt. Aus Bild B-13, Anhang B, gehen das autogene Schwinden (oben) und die Schwindreduzierung (unten) mit abgesetztem Wasserzementwert von $w/z = 0,25$ hervor.

Der Verlauf der schwindreduzierenden Wirkung von SRA3 und W2 entsprach qualitativ dem von Zementstein CEM I sowohl bei $w/z = 0,42$ als auch bei $w/z = 0,25$ (ohne SRA3). Der Wirkstoff W2 zeigte sowohl im jungen Alter wie auch nach 182 Tagen die größte schwindreduzierende Wirkung.

Mit W1 unterschied sich der Verlauf in Portlandzementstein CEM Ia mit $w/z = 0,42$ dahingehend von CEM I, dass innerhalb von zwei Tagen keine Abnahme der Schwindreduzierung und bis zum siebten Tag eine größere Zunahme der schwindreduzierenden Wirkung festgestellt wurde. Bei $w/z = 0,25$ war der qualitative Verlauf mit W2 vergleichbar, die Wirkung aber deutlich geringer.

Die Wirkung von SRA3, W1 und W2 im Zementstein CEM Ia im Alter von 182 Tagen ist in Bild 5-14 dargestellt. Bei $w/z = 0,42$ war die Wirkung der SRA vergleichbar. Bei $w/z = 0,25$ war die Wirkung von Wirkstoff W1 dagegen deutlich geringer als mit $w/z = 0,42$. Die jeweils größten Schwindreduzierungen im Alter von 182 Tagen wurden erwartungsgemäß mit Wirkstoff W2 ermittelt.

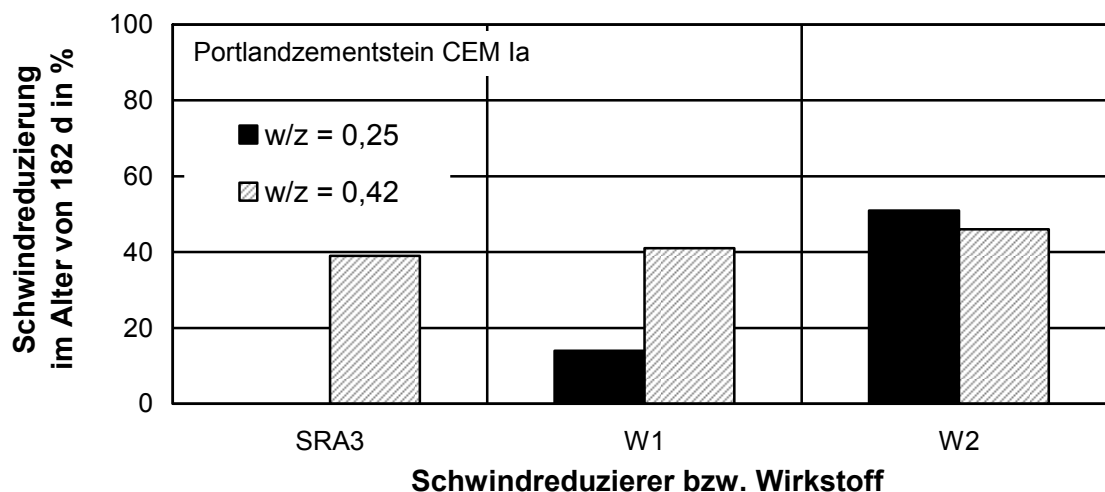


Bild 5-14 Reduzierung des autogenen Schwindens von Portlandzementstein CEM Ia im Alter von 182 Tagen bezogen auf die Referenz ohne Schwindreduzierer; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

5.3.3.6 SRA und HS-Portlandzementstein CEM I-HS

In Bild B-14, Anhang B, ist das autogene Schwinden (oben) und die schwindreduzierende Wirkung (unten) der SRA in Zementstein CEM I-HS mit $w/z = 0,42$ dargestellt. Aus Bild B-15, Anhang B, gehen das autogene Schwinden (oben) und die Schwindreduzierung (unten) mit abgesenktem Wasserzementwert von $w/z = 0,25$ hervor.

In HS-Portlandzementstein CEM I-HS mit $w/z = 0,42$ (s. Bild B-14, Anhang B) war die schwindreduzierende Wirkung von Schwindreduzierer SRA3 und Wirkstoff W2 ab einem Alter von sieben Tagen etwa gleich. Bis zu diesem Alter wies W2 eine größere Wirkung auf.

Der qualitative Verlauf der Wirkung von W1 unterschied sich von SRA3 und W2 deutlich. Vergleichbar mit Zementstein CEM I und CEM Ia nahm die Wirkung innerhalb der ersten sechs Tage zu und danach stetig bis zum Alter von 182 Tagen (Messende) wieder ab.

Mit Verringerung des Wasserzementwerts auf $w/z = 0,25$ wurden zwischen W1 und W2 deutliche Unterschiede festgestellt. (s. Bild B-15, Anhang B). Die Wirkung von W1 und W2 nahm über die Dauer von 182 Tagen ab. Hierbei war die Wirkung von W1 auf deutlich geringerem Niveau als die von W2. Während nach 91 Tagen W1 zu höherem Schwinden führte, reduzierte W2 das autogene Schwinden über den gleichen Zeitraum um etwa 50 %. Nach 182 Tagen betrug die Schwindreduzierung von SRA3 bzw. W2 in Abhängigkeit des Wasserzementwerts zwischen rd. 30 % bis 50 %. Mit W1 wurde in diesem Alter dagegen keine schwindreduzierende Wirkung festgestellt (s. Bild 5-15). Dies war auf Grund der bisherigen Ergebnisse mit CEM I und CEM Ia nicht zu erwarten.

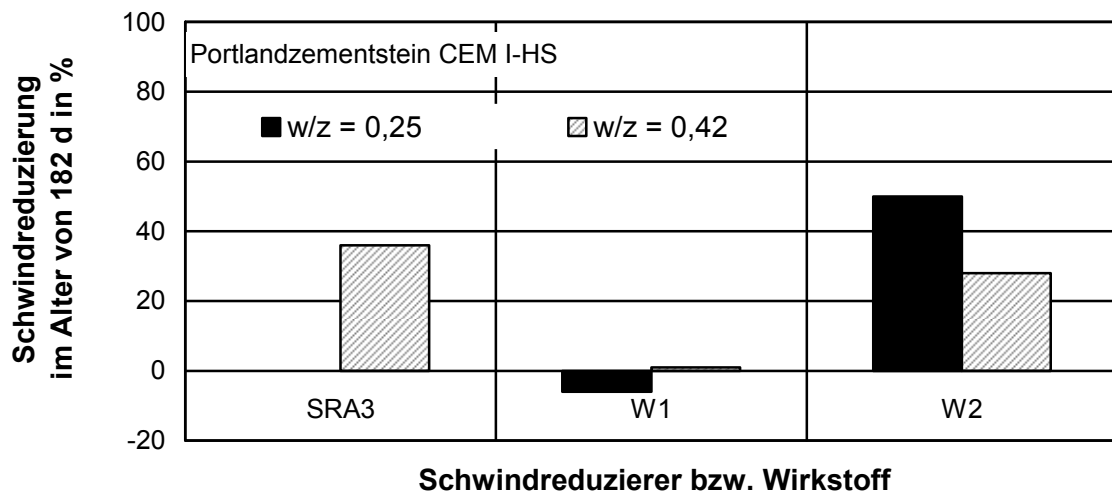


Bild 5-15 Reduzierung des autogenen Schwindens von Zementstein mit HS-Portlandzement CEM I-HS im Alter von 182 Tagen bezogen auf die Referenz ohne Schwindreduzierer; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

5.3.3.7 SRA und Portlandkalksteinzementstein CEM II

In Bild B-16, Anhang B, ist das autogene Schwinden (oben) und die schwindreduzierende Wirkung (unten) von SRA3, W1 und W2 in Portlandkalksteinzementstein CEM II mit $w/z = 0,42$ dargestellt. Aus Bild B-17, Anhang B, gehen das autogene Schwinden (oben) und die Schwindreduzierung (unten) mit abgesenktem Wasserzementwert von $w/z = 0,25$ hervor.

Wie aus Bild B-16, Anhang B, hervorgeht, war der Verlauf der schwindreduzierenden Wirkung von Schwindreduzierer SRA3 und von Wirkstoff W2 miteinander vergleichbar. Die schwindreduzierende Wirkung von Wirkstoff W1 war im Gegensatz zu SRA3 und W2 gering. Insbesondere innerhalb der ersten sieben Tage traten deutliche Unterschiede zwischen den Wirkstoffen auf. Ähnlich wie bei den Zementsteinen CEM I, CEM Ia, CEM I-HS nahm die Schwindreduzierung zunächst bis zum Erreichen eines Maximums zu und danach wieder ab.

Bei Absenkung des Wasserzementwerts auf $w/z = 0,25$ (s. Bild B-17, Anhang B) wurde bei Portlandkalksteinzementstein CEM II mit den Wirkstoffen W1 und W2 nach anfänglichem Schwinden eine Quellphase zwischen acht Stunden und 36 Stunden nach Wasserzugabe festgestellt. Insbesondere durch W2 wurde das Quellen über einen Zeitraum von rd. 20 Tagen nahezu unverändert hervorgerufen. Dadurch wurden Schwindreduzierungen von weit über 100 % ermittelt. Der qualitative Verlauf der schwindreduzierenden Wirkung war mit beiden Wirkstoffen ähnlich, der Betrag der Schwindreduzierung unterschied sich jedoch deutlich.

Die jeweilige Schwindreduzierung der Portlandkalksteinzementsteine CEM II mit den Wasserzementwerten von $w/z = 0,42$ und $w/z = 0,25$ durch SRA3, W1 und W2 im Alter von 182 Tagen ist in Bild 5-16 dargestellt. Mit SRA3 und W2 wurden jeweils deutliche Schwindreduzierungen von teilweise weit über 30 % ermittelt. W1 hingegen wies jeweils nur eine geringe Wirkung auf. Insbesondere beim Wasserzementwert von $w/z = 0,25$ war die schwindreduzierende Wirkung mit -7 % von W1 deutlich kleiner als die von W2 mit 77 %.

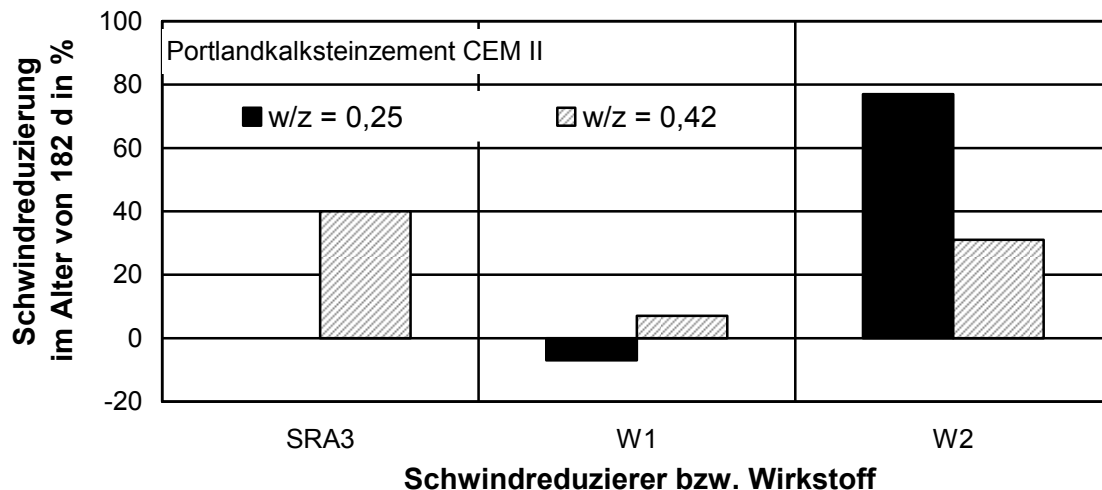


Bild 5-16 Reduzierung des autogenen Schwindens von Portlandkalksteinzementstein CEM II im Alter von 182 Tagen bezogen auf die Referenz ohne Schwindreduzierer; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

5.3.3.8 SRA und Hochofenzementstein CEM III

In Bild B-18, Anhang B, ist das autogene Schwinden (oben) und die schwindreduzierende Wirkung (unten) des Schwindreduzierers SRA3 und der Wirkstoffe W1 und W2 in Hochofenzementstein CEM III mit $w/z = 0,42$ dargestellt. Aus Bild B-19, Anhang B, gehen das autogene Schwinden (oben) und die Schwindreduzierung (unten) mit abgesenktem Wasserzementwert von $w/z = 0,25$ hervor.

Qualitativ war der Verlauf der Wirkung von SRA3, W1 und W2 bei $w/z = 0,42$ bis zum Alter von 14 Tagen vergleichbar. Charakteristisch bei Hochofenzementstein CEM III waren hierbei die abfallende Wirkung der SRA bis zum Alter von sechs bzw. sieben Tagen und die danach folgende Zunahme der Schwindreduzierung.

Im Gegensatz zu SRA3 und W2 ging die Wirkung von W1 nach 14 Tagen deutlich zurück. Ein weiterer wesentlicher Unterschied des Wirkstoffs W1 zu SRA3 und W2 bestand darin, dass das autogene Schwinden nahezu über den gesamten Untersuchungszeitraum größer als bei der Referenzprobe war. D. h. die Probe wies ein höheres autogenes Schwinden auf.

Bei Absenkung des Wasserzementwerts auf $w/z = 0,25$ wurde bei Hochofenzementstein CEM III, ähnlich wie bei CEM II, mit den Wirkstoffen W1 bzw. W2 nach anfänglichem Schwinden eine Quellphase zwischen 12 Stunden bzw. 48 Stunden nach Wasserzugabe festgestellt. Dadurch wurden Schwindreduzierungen von weit über 100 % (max. rd. 2700 %) ermittelt.

Die Wirkung von W1 nahm nach dieser Quellphase deutlich ab und betrug nach 56 Tagen weniger als 0 %, d. h. das autogene Schwinden war ab diesem Alter größer als bei der Referenzprobe. Die Schwindreduzierung von W2 veränderte sich dagegen ab einem Alter von rd. 14 Tagen nicht mehr signifikant.

Die jeweilige Schwindreduzierung im Alter von 182 Tagen ist in Bild 5-17 angegeben. Die größten Schwindreduzierungen wurden jeweils mit Wirkstoff W2 ermittelt. Im Gegensatz dazu wies Wirkstoff W1 im gleichen Alter keine schwindreduzierende Wirkung mehr auf und rief in Bezug auf die jeweilige Referenzprobe ohne SRA sogar größere autogene Schwinddehnungen hervor.

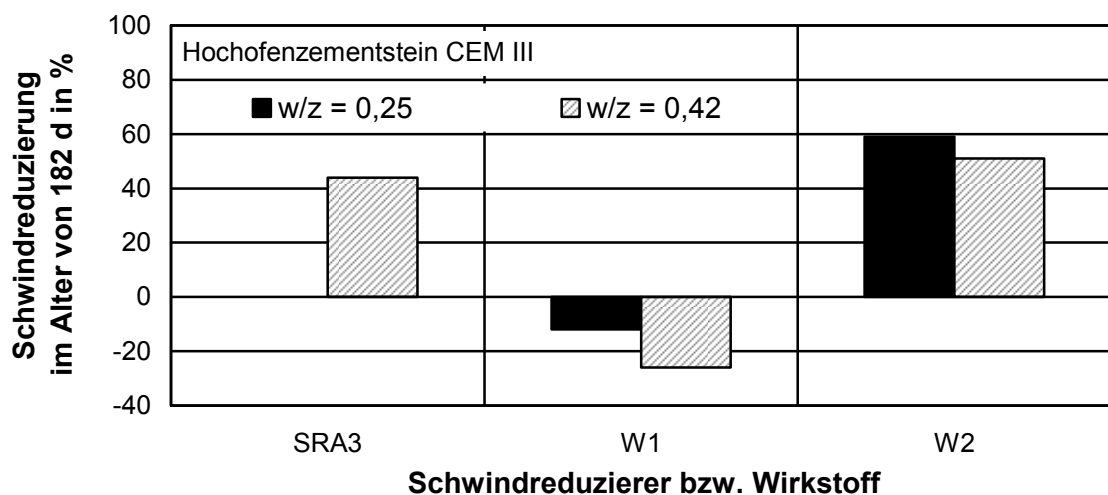


Bild 5-17 Reduzierung des autogenen Schwindens von Hochofenzementstein CEM III im Alter von 182 Tagen bezogen auf die Referenz ohne Schwindreduzierer; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

5.3.3.9 Wirkung der SRA in Abhängigkeit von der Zementart

In diesem Abschnitt ist die schwindreduzierende Wirkung des untersuchten Schwindreduzierers SRA3 sowie der Wirkstoffe W1 und W2 in Abhängigkeit von der Zementart und des Wasserzementwerts dargestellt.

Mit Schwindreduzierer SRA3 (s. Bild 5-18, oben) wurde mit Ausnahme des Hochofenzementsteins CEM III ab einem Alter von 14 Tagen eine von der Zementart weitestgehend unabhängige Schwindreduzierung festgestellt. In Hochofenzementstein CEM III war die Wirkung bis zu einem Alter von 56 Tagen um bis zu rd. 40 % geringer als bei

den übrigen Zementsteinen. Danach waren die jeweiligen Schwindreduzierungen miteinander vergleichbar.

Mit Wirkstoff W1 (s. Bild 5-18, mitte) war der Verlauf der jeweiligen Schwindreduzierung mit CEM Ia, CEM I-HS und CEM II qualitativ etwa gleich. Mit CEM I und CEM III nahm die Schwindreduzierung zunächst ab. Danach nahm die jeweilige Schwindreduzierung unabhängig von der Zementart bis zu einem Alter von rd. sechs Tagen bis 14 Tagen zu und erreichte jeweils einen lokalen maximalen Wert, der zwischen rd. 60 % (CEM Ia) und rd. 10 % (CEM III) lag. Über das entsprechende Alter hinaus nahm die schwindreduzierende Wirkung danach wieder ab.

Der Betrag der Schwindreduzierung war dagegen deutlich von der Zementart abhängig. Die größte Schwindreduzierung wurde in den Zementsteinen auf Basis des Portlandzements (CEM I und CEM Ia) ermittelt. In Zementstein CEM I-HS und CEM II war die Wirkung über den Untersuchungszeitraum vergleichbar und geringer als mit CEM I und CEM Ia. Im Alter von 182 Tagen wurde die Wirkung von W1 jedoch aufgehoben. Die geringste schwindreduzierende Wirkung von W1 wurde in dem untersuchten Hochofenzementstein CEM III ermittelt. Im Vergleich zur entsprechenden Referenzprobe war das autogene Schwinden mit W1 nach 182 Tagen sogar um bis zu 25 % größer.

Der Wirkstoff W2 (s. Bild 5-18, unten) reduzierte das autogene Schwinden von Zementstein weitestgehend unabhängig von der Zementart. In allen Zementsteinen wurde eine deutliche Abnahme der schwindreduzierenden Wirkung innerhalb der ersten sieben Tage festgestellt. Danach veränderte sich die jeweilige Schwindreduzierung bis zu einem Alter von 182 Tagen nur noch geringfügig.

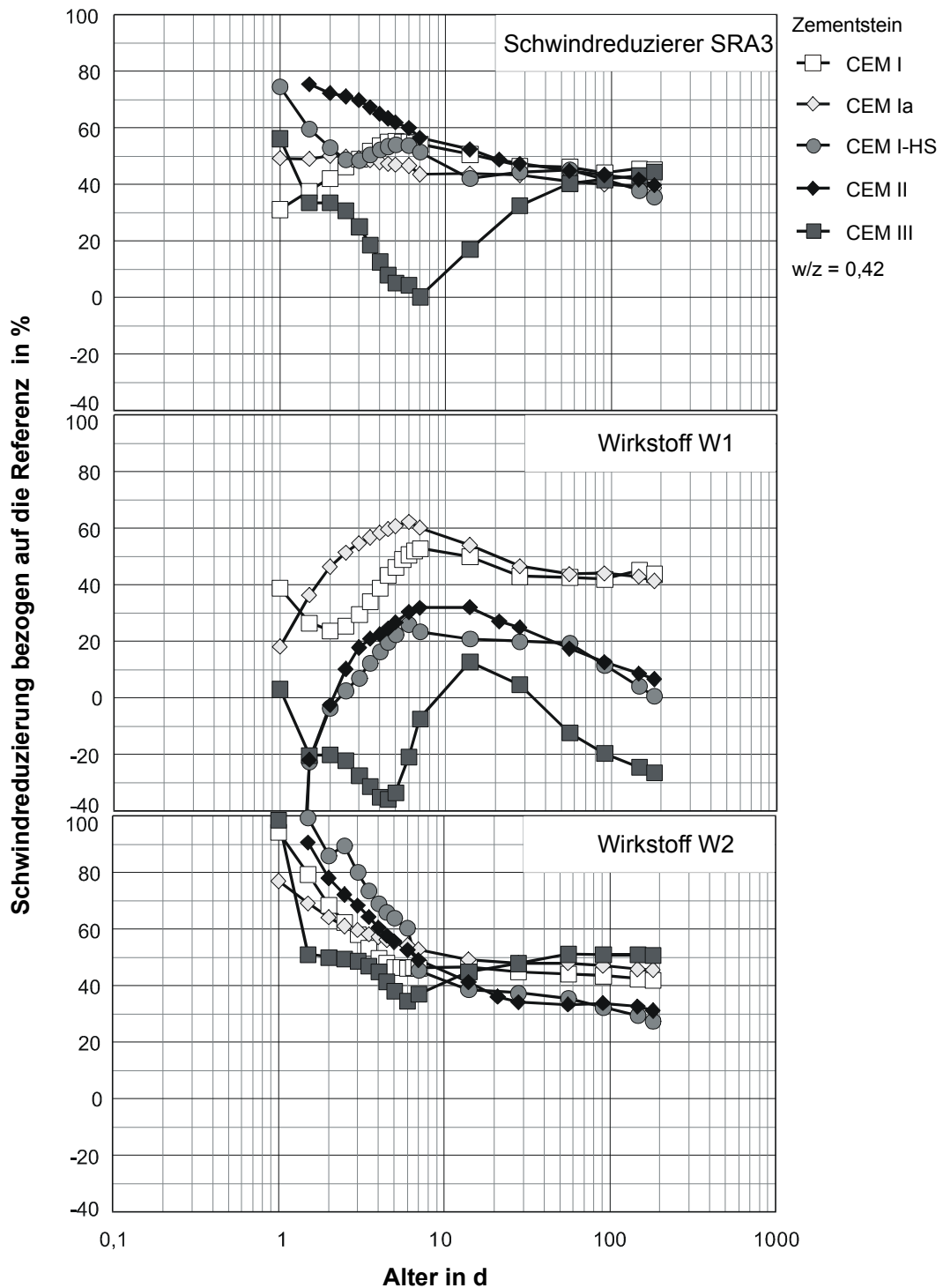


Bild 5-18 Einfluss der Zementart auf die Reduzierung des autogenen Schwindens von Zementstein mit $w/z = 0,42$ durch Schwindreduzierer SRA3, Wirkstoff W1 und Wirkstoff W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

Die durch die Schwindreduzierer hervorgerufene Reduzierung des autogenen Schwindens von Zementstein mit $w/z = 0,42$ im Alter von 182 Tagen ist in Bild 5-19 dargestellt. Schwindreduzierer SRA3 und W2 zeigten in diesem Alter jeweils vergleichbare

Wirkungen. Offenbar wird die schwindreduzierende Wirkung des Schwindreduzierers SRA3 durch den darin enthaltenen Wirkstoff W2 (s. Bild 5-1 bzw. Tabelle A-3, Anhang A) stärker beeinflusst als durch Wirkstoff W1.

W1 zeigte in den Zementsteinen aus Portlandzement (CEM I und CEM Ia) eine ähnliche Wirkung wie SRA3 und W2. Beim C₃A-armen HS-Portlandzementstein CEM I-HS bzw. bei den Zementsteinen mit CEM II bzw. CEM III war die jeweilige schwindreduzierende Wirkung nach 182 Tagen jedoch aufgehoben. Folglich ist der Beitrag des Wirkstoffs W1 an der schwindreduzierenden Wirkung des Schwindreduzierers SRA3, in dem W1 zu rd. 50 % enthalten ist, in diesen Zementsteinen gering (s. Bild 5-1 bzw. Tabelle A-3, Anhang A).

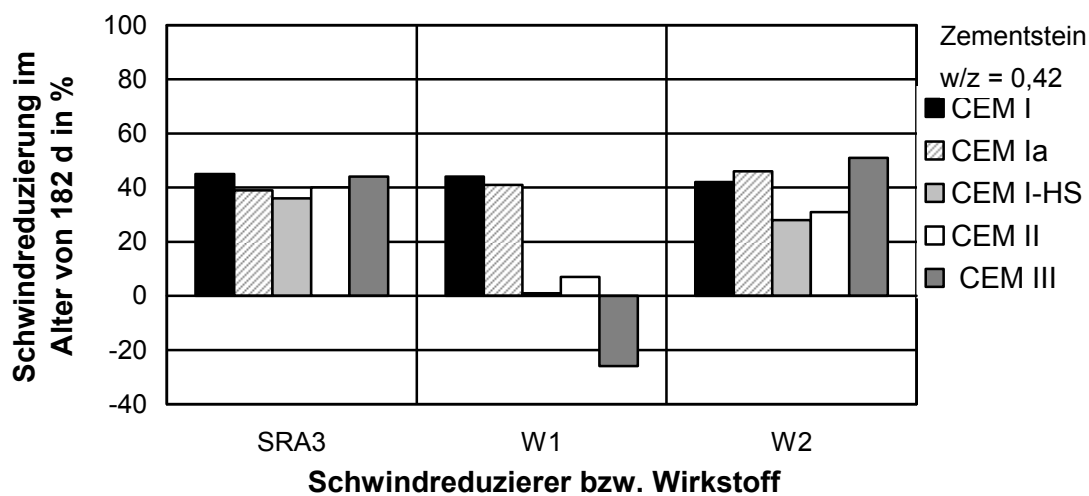


Bild 5-19 Reduzierung des autogenen Schwindens von Zementstein mit $w/z = 0,42$ im Alter von 182 Tagen bezogen auf die Referenz ohne Schwindreduzierer; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

Die schwindreduzierende Wirkung von W1 und W2 in Zementstein mit $w/z = 0,25$ in Abhängigkeit von der Zementart ist in Bild 5-20 dargestellt.

Im Vergleich zum Wasserzementwert von $w/z = 0,42$ nahm die Wirkung von W1 durch die Absenkung des Wasserzementwerts auf $w/z = 0,25$ außer bei Portlandzementstein CEM I bei allen Zementsteinen ab. In den untersuchten Zementsteinen CEM I-HS, CEM II und CEM III war die Wirkung von W1 ab einem Alter von rd. 56 Tagen sogar aufgehoben und die autogene Schwinddehnung war größer als bei den jeweiligen Referenzproben.

Im Gegensatz dazu nahm die schwindreduzierende Wirkung von W2 mit $w/z = 0,25$ im Vergleich zu $w/z = 0,42$ zu. Ähnlich wie bei $w/z = 0,42$ nahm die Schwindreduzierung mit zunehmendem Alter ab. Sie lag im Alter von 182 Tagen in allen Zementsteinen mit $w/z = 0,25$ über 50 %.

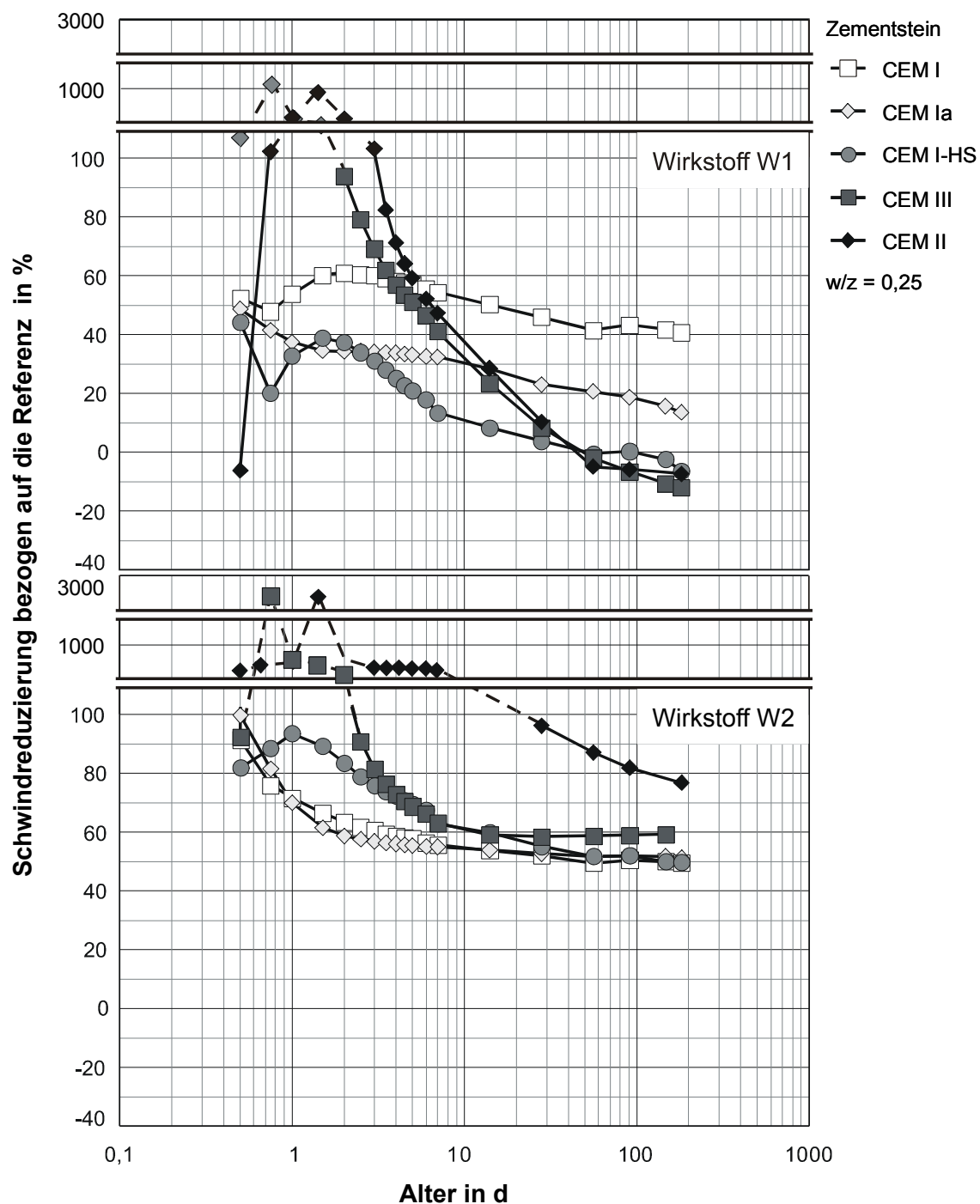


Bild 5-20 Einfluss der Zementart auf die Reduzierung des autogenen Schwindens von Zementstein mit $w/z = 0,25$ durch die Wirkstoffe W1 und W2 bezogen auf die Referenz ohne Schwindreduzierung; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

Die jeweilige schwindreduzierende Wirkung der beiden Wirkstoffe W1 und W2 in Zementstein mit $w/z = 0,25$ im Alter von 182 Tagen ist in Bild 5-21 dargestellt. Aus dem Bild geht hervor, dass W1 in den untersuchten Zementsteinen CEM I-HS, CEM II und

CEM III in diesem Alter keine Wirkung mehr zeigte. W2 dagegen reduzierte das autogene Schwinden unabhängig von der Zementart um über 50 %.

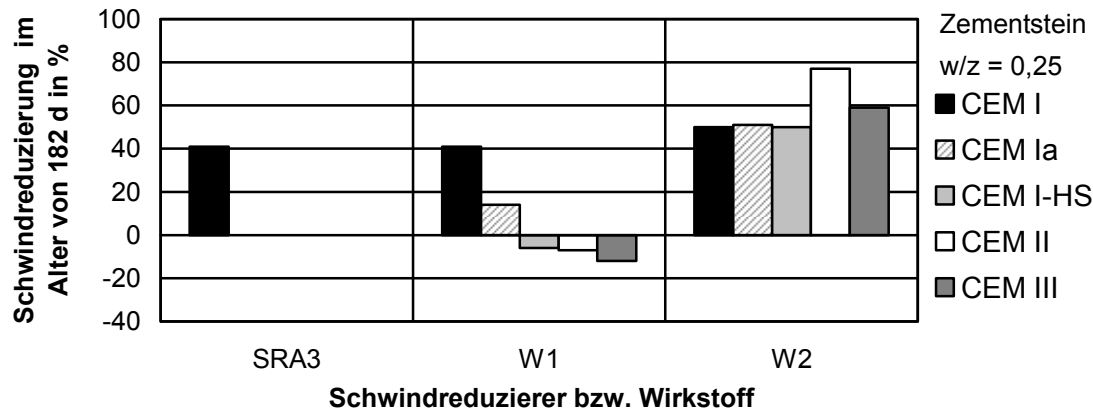


Bild 5-21 Reduzierung des autogenen Schwindens von Zementstein mit $w/z = 0,25$ im Alter von 182 Tagen bezogen auf die Referenz ohne Schwindreduzierer; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

5.3.3.10 Zusammenhang zwischen Oberflächenspannung der Porenlösung und autogenem Schwinden

Geht man von der Annahme aus, dass die Wirkung schwindreduzierender Zusatzmittel auf die Absenkung der Oberflächenspannung des Kapillarporenwassers zurückzuführen ist (vgl. Abschnitt 2.4.4.2) [Sat 83], liegt die Vermutung nahe, dass die Reduzierung des autogenen Schwindens mit der Reduzierung der Oberflächenspannung in direktem Zusammenhang steht.

Bei Betrachtung der Ergebnisse aus Abschnitt 5.3.2.1 liegt der Schluss nahe, dass durch die Schwindreduzierer vom „Typ 1“ (s. Abschnitt 5.1.3) SRA2, SRA3 sowie Wirkstoff W2 ein vergleichbarer Einfluss auf das autogene Schwinden zu erwarten sei, da diese Zusatzmittel die Oberflächenspannung der Porenlösung in gleichem Maße um rd. 60 % absenkten. Mit Schwindreduzierer SRA1 bzw. Wirkstoff W1, die dem „Typ 2“ zugeordnet wurden und die Oberflächenspannung um rd. 45 % bzw. rd. 30 % absenkten, wäre demzufolge eine entsprechend geringere Abminderung des autogenen Schwindens zu erwarten.

Weiterhin wäre auf Grund der Ergebnisse, die zur Oberflächenspannung an der Porenlösung ermittelt wurden, zu erwarten, dass die Wirkung der Schwindreduzierer bei allen Zementsteinen (CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III) relativ zur Referenz etwa gleich ist und über das Alter von 28 Tagen hinaus keine Veränderung der schwindreduzierenden Wirkung auftreten.

In Bild 5-22 ist die relative Oberflächenspannung der Porenlösung von Portlandzementstein CEM I mit SRA1, SRA2, SRA3, W1 und W2 sowie von Zementstein CEM Ia,

CEM I-HS, CEM II und CEM III mit SRA3 bezogen auf die Oberflächenspannung der Porenlösung ohne Schwindreduzierer, im Alter von 2, 7, 28, 91 und 182 Tagen der jeweiligen Schwindreduzierung bezogen auf die Referenz ohne Schwindreduzierer gegenübergestellt.

Aus dem Bild geht hervor, dass kein Zusammenhang zwischen der relativen Oberflächenspannung der Porenlösung und der Reduzierung des autogenen Schwindens besteht. Die Ergebnisse zum Einfluss der Schwindreduzierer auf die Oberflächenspannung der Porenlösung (s. Abschnitt 5.3.2.1) zeigten kaum noch Veränderungen der Oberflächenspannung der Porenlösung ab einem Alter von sieben Tagen. Dagegen nahm die schwindreduzierende Wirkung der Schwindreduzierer und Wirkstoffe in den überwiegenden Fällen, insbesondere im jungen Alter, ab. Zudem reduzierten die Schwindreduzierer vom „Typ 1“ bei nahezu gleicher Wirkung auf die Oberflächenspannung (SRA2, SRA3 und W2) das autogene Schwinden teilweise sehr unterschiedlich (s. Bild 5-13). Dies zeigt, dass nicht nur die reduzierte Oberflächenspannung der Porenlösung sondern vermutlich auch noch andere Mechanismen für die schwindreduzierende Wirkung der Zusatzmittel und Wirkstoffe verantwortlich sein müssen.

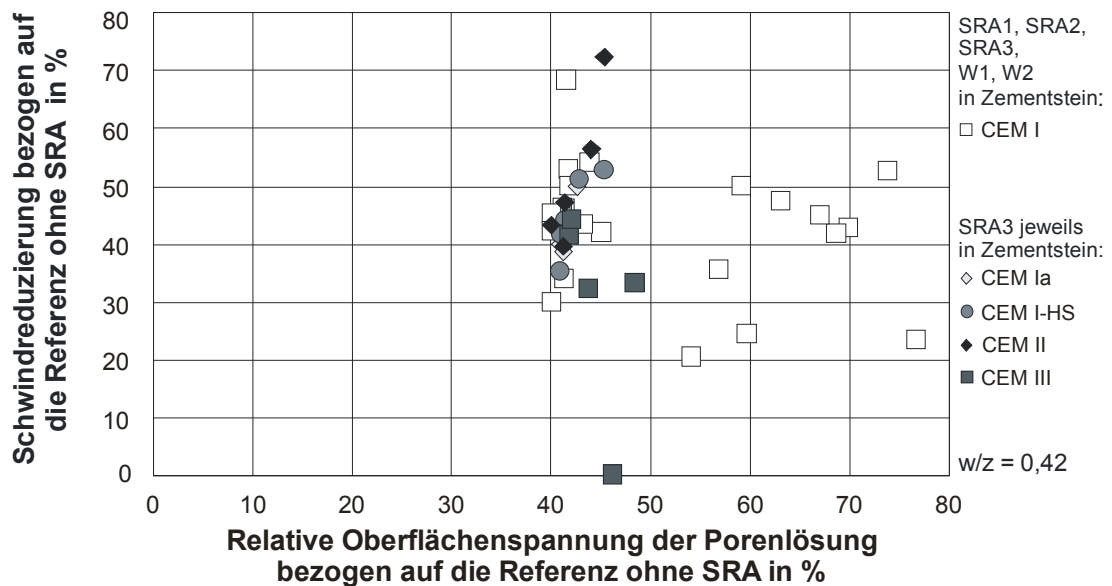


Bild 5-22 Zusammenhang zwischen relativer Oberflächenspannung der Porenlösung und Reduzierung des autogenen Schwindens von Zementstein mit $w/z = 0,42$ und den Zementsteinen CEM I (mit SRA1, SRA2, SRA3, W1 und W2) sowie CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III (jeweils mit SRA3); Dosierung: 4,5 M.-% v. w

5.3.3.11 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das autogene Schwinden von Zementstein mit $w/z = 0,25$, $w/z = 0,42$ und $w/z = 0,50$ wurde durch die handelsüblichen Schwindreduzierer SRA1, SRA2 und SRA3 sowie den Wirkstoff W2 um bis zu 77 % im Alter von 182 Tagen reduziert. Die Wirkung von

Wirkstoff W1 ging in Abhängigkeit der Zementart und des Wasserzementwerts teilweise vollständig verloren und es wurden in einigen Fällen größere autogene Schwindverformungen ermittelt als bei den jeweiligen Referenzproben. Die in Abschnitten 5.3.3 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die schwindreduzierende Wirkung der Schwindreduzierer und Wirkstoffe je nach Zementart, Wasserzementwert und Alter sehr unterschiedlich sein kann. Hierbei war die Wirkung von W2 weitestgehend zementunabhängig und nahm mit abnehmendem Wasserzementwert und mit zunehmendem Alter ab.

Die schwindreduzierende Wirkung des handelsüblichen Schwindreduzierers SRA3 wird offenbar durch den darin zu rd. 50 % enthaltenen Wirkstoff W2 hervorgerufen. Eine Ausnahme stellte hierbei der untersuchte Zementstein mit Hochofenzement CEM III dar, bei dem die Schwindreduzierung von SRA3 deutlich durch W1 beeinflusst wurde (s. Bild 5-18, oben).

Mit W1 wurde jeweils in den untersuchten Zementsteinen mit CEM I-HS, CEM II und CEM III keine anhaltende Schwindreduzierung ermittelt. Die Wirkung nahm mit zunehmendem dem Alter deutlich ab und war teilweise nach 56 Tagen bereits aufgehoben. Der Beitrag des Wirkstoffs W1 an der schwindreduzierenden Wirkung von SRA3 scheint gering zu sein.

Ein Zusammenhang zwischen der Reduzierung des autogenen Schwindens und der relativen Oberflächenspannung der Porenlösung besteht nicht.

5.3.4 Porengefüge von Zementstein

5.3.4.1 Allgemeines

In Abschnitt 5.3.3 wurde dargestellt, dass die durch SRA herabgesetzte Oberflächenspannung der Porenlösung kaum eine systematische Ursache für die Reduzierung des autogenen Schwindens darstellt. Als weitere, das Schwindverhalten von Zementstein beeinflussende Kenngröße, wurde die Struktur des Porenraums untersucht. Je kleiner die Poren im Zementstein sind, umso größer sind die bei Änderungen der Feuchte zu erwartenden Spannungen im Gefüge und das zu erwartende Schwinden.

Mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie wurde der Porenraum der Zementsteine charakterisiert und der Einfluss der SRA bis zum Alter von 91 Tagen ermittelt. Um die Beurteilung der Einflüsse schwindreduzierender Zusatzmittel auf die Porenradienverteilung zu erleichtern, wurde bei Auswertung der Ergebnisse zwischen zwei Porengrößenanteilen unterschieden. Poren mit Radien unterhalb von 10 nm wurden den Gelporen zugerechnet. Größere Poren wurden den Kapillarporen zugeordnet.

5.3.4.2 Gesamtporosität und Porenradienverteilung von Zementstein ohne SRA

Die zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität der Zementsteine CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,42$ im Alter zwischen 2 und 91 Tagen ist in Bild 5-23 dargestellt. Im Alter von zwei Tagen betrugen die Gesamtporositäten zwischen rd. 27 Vol.-% (CEM II) bis rd. 35 Vol.-% (CEM III).

Erwartungsgemäß nahm die jeweilige Gesamtporosität bis zum Alter von 91 Tagen um etwas die Hälfte ab und betrug zwischen 13 Vol.-% (CEM I) und 19 Vol.-% (CEM Ia).

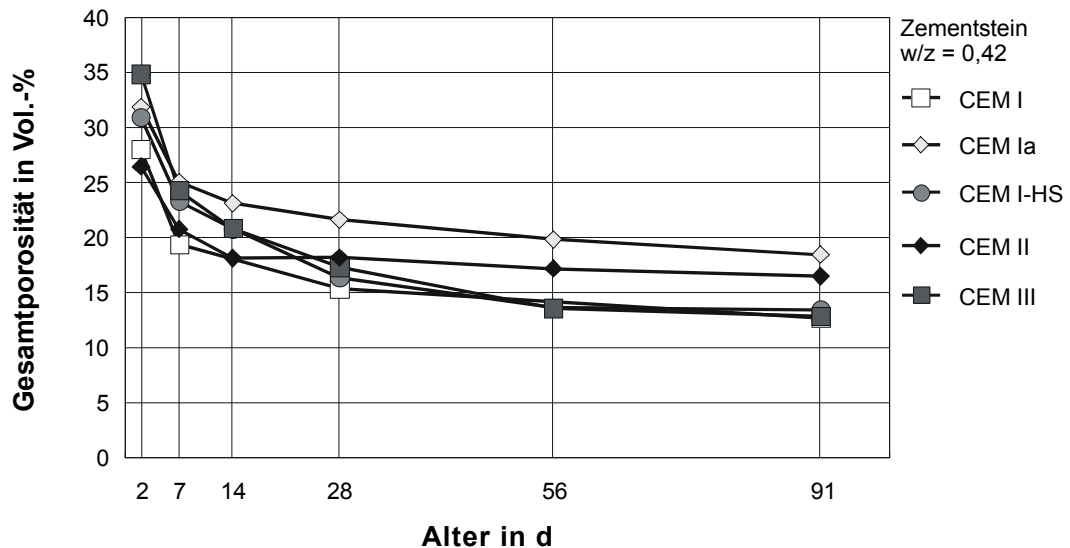


Bild 5-23 Gesamtporosität der Zementsteine CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III und $w/z = 0,42$ ohne schwindreduzierende Zusatzmittel

Die Entwicklung der Gel- bzw. Kapillarporosität bezogen auf den jeweiligen Zementstein ohne SRA ist in Bild B-20 bzw. in Bild B-21, Anhang B, dargestellt. Die Gelporosität im Alter von zwei Tagen betrug weitestgehend unabhängig von der Zementart rd. 6 Vol.-% bis rd. 7 Vol.-%. Bis zu einem Alter von 91 Tagen nahm sie auf rd. 9 Vol.-% (CEM I, CEM I-HS und CEM II) bis rd. 11 Vol.-% (CEM Ia und CEM III) zu.

Die größte Gelporosität wies der untersuchte Hochofenzementstein CEM III auf. Bei diesem Zementstein nahm die Gelporosität bis zu einem Alter von 28 Tagen zu und danach ab. Diese ungewöhnliche Entwicklung wurde auf einen Artefakt bei der Bestimmung der Porosität zurückgeführt und kann wie folgt erklärt werden. Bei der Quecksilberpenetration können mit einem maximalen Enddruck von rd. 2000 bar Poren mit Eingangsradien größer als 3,4 nm erfasst werden. Die für Zementstein mit Hochofenzement typisch deutliche Verfeinerung des Porensystems mit fortschreitender Hydratation ist bis zu einem Alter von 28 Tagen zu erkennen (Bild B-20, Anhang B). Es ist zu vermuten, dass über dieses Alter hinaus der Anteil an Poren mit Radien unterhalb von 3,4 nm zunahm, dieser jedoch durch das Messsystem nicht mehr erfasst wurde. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Anteil an Gelporen im Zementstein mit Hochofenzement CEM III ab einem Alter von 28 Tagen größer als 13 Vol.-% ist. Gleichzeitig wäre ab einem Alter von 28 Tagen eine etwas erhöhte Gesamtporosität zu erwarten gewesen.

Die Kapillarporosität der Zementsteine betrug im Alter von zwei Tagen rd. 20 Vol.-% (CEM II) bis rd. 29 Vol.-% (CEM III). Erwartungsgemäß nahm die Kapillarporosität

mit fortschreitender Hydratationsdauer bis zum Alter von 91 Tagen auf rd. 3 Vol.-% (CEM III) bis rd. 8 Vol.-% (CEM Ia und CEM II) ab.

5.3.4.3 Einfluss der SRA auf die Gesamtporosität und Porenradienverteilung von Zementstein

Der Einfluss der SRA auf das Porengefüge von Zementstein wurde anhand von Zementstein mit Portlandzement CEM I bei Wasserzementwerten von $w/z = 0,42$ und $w/z = 0,25$ untersucht. Der Einfluss der Zementart wurde am Beispiel des Schwindreduzierers SRA3 in Zementstein mit $w/z = 0,42$ ermittelt. Bei diesem Wasserzementwert wurde ergänzend dazu der Einfluss der Wirkstoffe W1 und W2 auf das Porengefüge der Zementsteine CEM Ia und CEM III bestimmt.

Die umfangreichen, mit Quecksilberdruckporosimetrie ermittelten, Untersuchungsergebnisse werden in dieser Arbeit zusammenfassend als relative Porosität, bezogen auf die jeweilige Referenzprobe ohne SRA, dargestellt. Dies erleichtert einerseits die Beurteilung des Einflusses der SRA auf das Porengefüge von Zementstein. Andererseits kann die Wirkung der SRA auf das Porengefüge in den verschiedenen Zementsteinen besser miteinander verglichen werden. Im Folgenden sind in Bild 5-24 bis Bild 5-27 sowie in Bild B-22, Anhang B, die Bereiche der relativen Porosität schraffiert und unterteilt in Gesamtporosität (grau) sowie in die Anteile der Gelporen (dunkelgrau) und der Kapillarporen (hellgrau) in Relation zur jeweiligen Referenzprobe ohne SRA dargestellt. Die Auswertung erfolgte bei Zementsteinen mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,42$ bis zu einem Druck von rd. 2000 bar und bei einem Wasserzementwert von $w/z = 0,25$ bis zu einem Druck von rd. 4000 bar.

Aus Bild 5-24 geht der Einfluss der SRA auf die Porosität und die jeweiligen Porenanteile von Zementstein CEM I hervor. In dem Bild wird deutlich, dass die Gesamtporosität teilweise geringfügig reduziert wurde. Der Anteil an Gelporen wurde erhöht und der Anteil an Kapillarporen reduziert. Insbesondere SRA3 und W1 führten zu einer deutlichen Verfeinerung des Porensystems im Alter zwischen 7 und 28 Tagen.

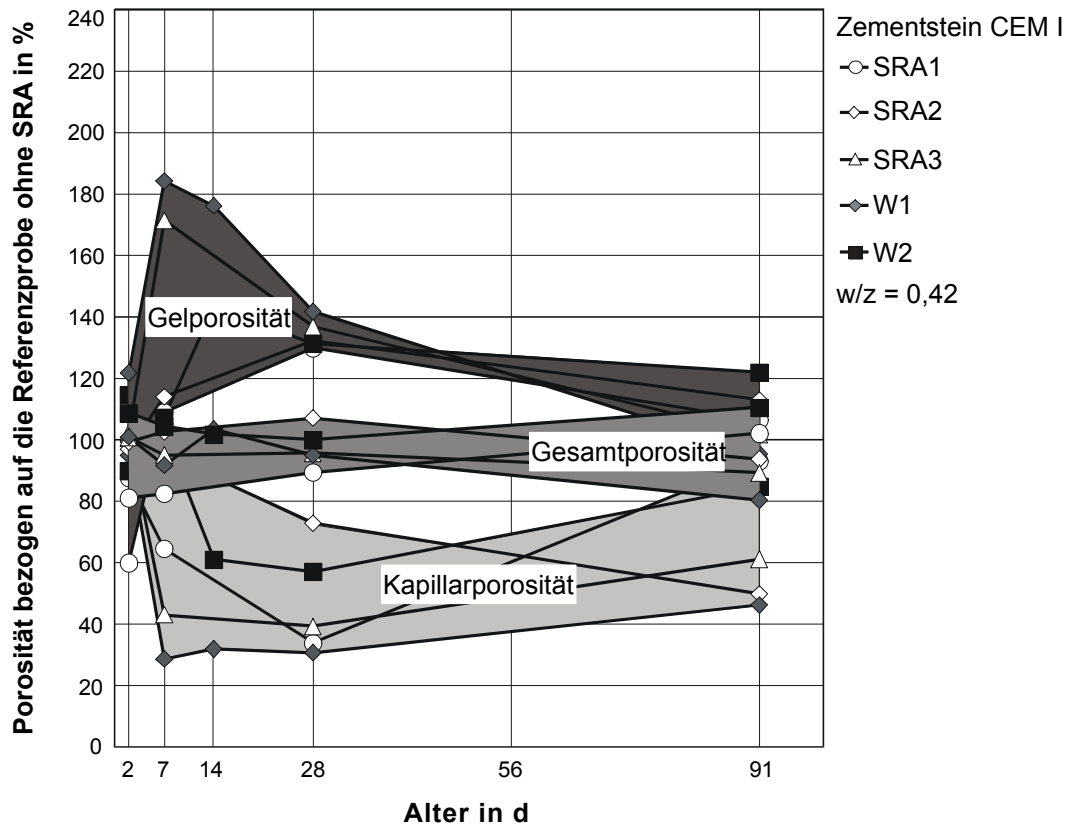


Bild 5-24 Einfluss von SRA1, SRA2, SRA3, W1 und W2 auf die Porosität von Zementstein mit CEM I mit $w/z = 0,42$; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

SRA3 und W1 wurden ausgewählt, um an verschiedenen Zementsteinen zu untersuchen, ob der Einfluss auf die Porosität eine wirkstoffspezifische Eigenschaft darstellt. Beide SRA wurden ausgewählt, da sie die Porenradienverteilung des Zementsteins CEM I am stärksten veränderten. Ergänzend dazu wurde Wirkstoff W2 ebenfalls in die Untersuchungen einbezogen, da dieser Wirkstoff neben W1 auch zu rd. 50 % in SRA3 enthalten ist. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abschnitten 5.3.4.4 bis 5.3.4.6 dargestellt.

5.3.4.4 Einfluss des Schwindreduzierers SRA3

In Bild 5-25 ist der Einfluss des Schwindreduzierers SRA3 auf die Porosität von Zementstein (CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III) mit $w/z = 0,42$, jeweils bezogen auf die Porosität der Referenzprobe ohne SRA, dargestellt.

Aus dem Bild geht hervor, dass die Gelporosität (Poren mit Eingangsradien kleiner als 10 nm) in Abhängigkeit von der Zementart, insbesondere im jungen Alter, erhöht wurde. Bis auf Zementstein CEM I und CEM III war der Gelporenanteil zwischen 7 und 14 Tagen mit SRA3 rd. doppelt so hoch wie bei der jeweiligen Referenzprobe ohne SRA. Bis zum Alter von 91 Tagen verringerte sich der Gelporenanteil wieder und lag rd. 35 % bis rd. 70 % über dem der Referenzprobe. Dies wird darauf zurückgeführt, dass

sich bei zunehmender Gelporosität der Referenzprobe ohne SRA die Gelporosität des Zementsteins mit SRA3 nicht veränderte oder abnahm.

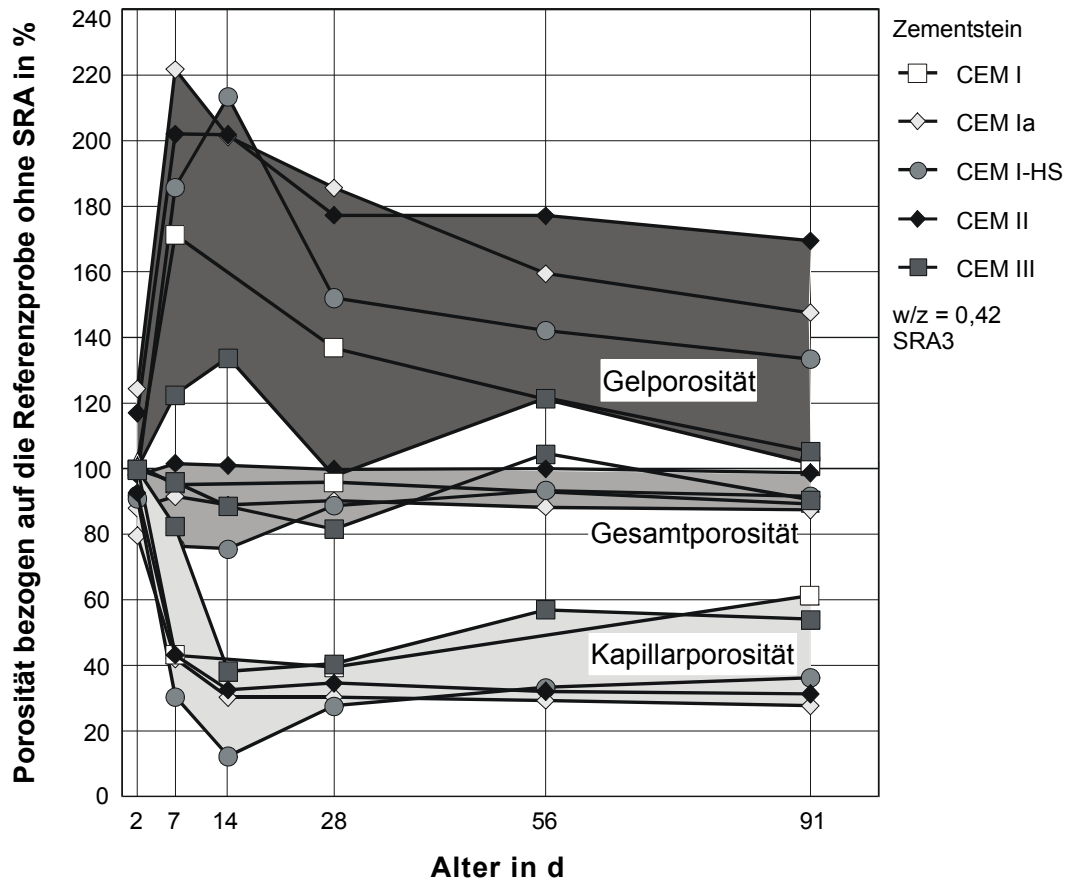


Bild 5-25 Einfluss des Schwindreduzierers SRA3 auf die Porosität der Zementsteine mit CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III mit w/z = 0,42; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

Der Kapillarporenanteil nahm bei zunehmendem Gelporenanteil in Abhängigkeit des Alters und der Zementart um bis zu rd. 70 % ab. Bis zum Alter von 91 Tagen veränderte sich die relative Kapillarporosität der Zementsteine mit CEM Ia, CEM I-HS und CEM II nicht mehr wesentlich. Bei den untersuchten Zementsteinen mit CEM I und CEM III nahm die relative Kapillarporosität mit fortschreitender Hydratation ab einem Alter von 28 Tagen zu und betrug nach 91 Tagen rd. 60 %. Dies ist auf die stärker abnehmende Kapillarporenanteile der entsprechenden Referenzproben ohne SRA zurückzuführen.

5.3.4.5 Einfluss des Wirkstoffs W1

Zusätzlich zum Einfluss des Schwindreduzierers SRA3 wurde exemplarisch der Einfluss der beiden Wirkstoffe W1 und W2 auf die Porosität der Zementsteine CEM I, CEM Ia und CEM III untersucht.

In Bild 5-26 ist zu erkennen, dass die relative Gesamtporosität der Zementsteine mit $w/z = 0,42$ durch den Wirkstoff W1 geringfügig beeinflusst wurde. Nach 91 Tagen waren die Gesamtporenanteile um rd. 10 % bis 20 % geringer als bei der entsprechenden Referenzprobe.

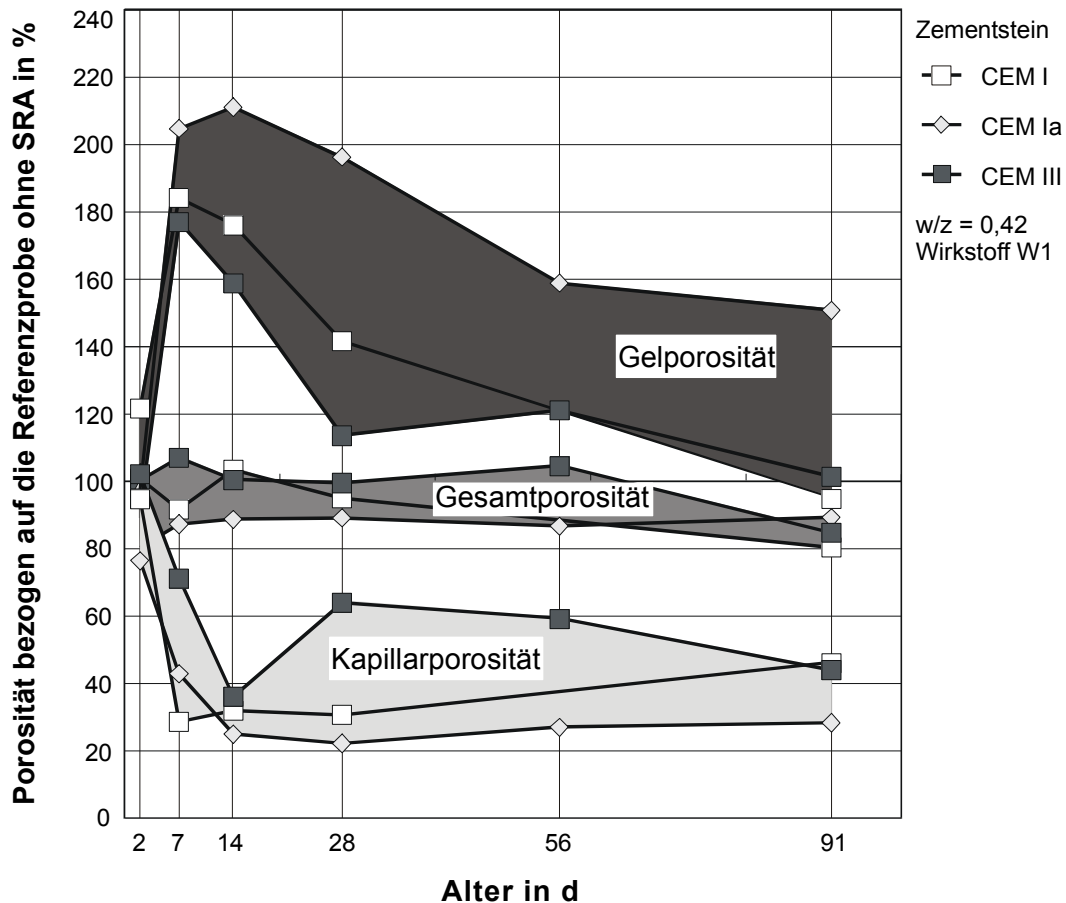


Bild 5-26 Einfluss des Wirkstoffs W1 auf die Porosität der Zementsteine mit CEM I, CEM Ia und CEM III mit $w/z = 0,42$; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

Die Gelporenanteile nahmen durch den Wirkstoff W1 signifikant zu. Im Alter zwischen 7 und 14 Tagen betrug die Zunahme bis zu 110 % (CEM Ia). Dieser Einfluss von W1 auf die Porenradienverteilung der Zementsteine war mit dem von Schwindreduzierer SRA3 vergleichbar. Die Abnahme der auf die Referenzprobe bezogenen Gelporosität bis zum Alter von 91 Tagen war vermutlich auf eine Zunahme der Gelporenanteile in der jeweiligen Referenzprobe bei gleichzeitig abnehmendem Gelporenanteil in der Probe mit Wirkstoff W1 zurückzuführen (vgl. auch mit Abschnitt 5.3.4.4). Erwartungsgemäß nahm gleichzeitig der Anteil an Kapillarporen durch den Wirkstoff W1 deutlich ab und betrug im Alter von 91 Tagen bei CEM I und CEM III rd. 45 % und bei CEM Ia rd. 28 % in Bezug auf die jeweilige Referenz.

Der Einfluss des Wirkstoffs W1 auf die Porosität von Zementstein CEM I bei $w/z = 0,25$ ist in Bild B-22, Anhang B, dargestellt. Aus dem Bild geht hervor, dass -vergleichbar mit $w/z = 0,42$ - durch den Wirkstoff W1 die Gesamtporosität geringfügig verringert wurde, die Gelporenanteile zunahmen und Kapillarporenanteile abnahmen.

5.3.4.6 Einfluss des Wirkstoffs W2

In Bild 5-27 ist zu erkennen, dass in Zementstein CEM I bzw. CEM III die Gesamtporosität um bis zu rd. 10 % bzw. rd. 35 % zunahm. Im Gegensatz dazu verringerte sich die Gesamtporosität von Zementstein CEM Ia um rd. 10 %.

Die Gelporenanteile in den Zementsteinen CEM I und CEM III wurden im Vergleich zur jeweiligen Referenzprobe um bis zu rd. 50 % erhöht. In Zementstein CEM Ia wurde keine signifikante Veränderung der Gelporosität festgestellt. In diesem Punkt unterschied sich die Wirkung von W2 deutlich von W1.

Die Kapillarporenanteile in den Zementsteinen CEM I und CEM Ia verringerten sich durch W2 um bis zu 40 %. In Zementstein CEM III waren die Kapillarporenanteile im Alter von 7, 14 und 91 Tagen sogar um rd. 20 % höher als bei der Referenzprobe.

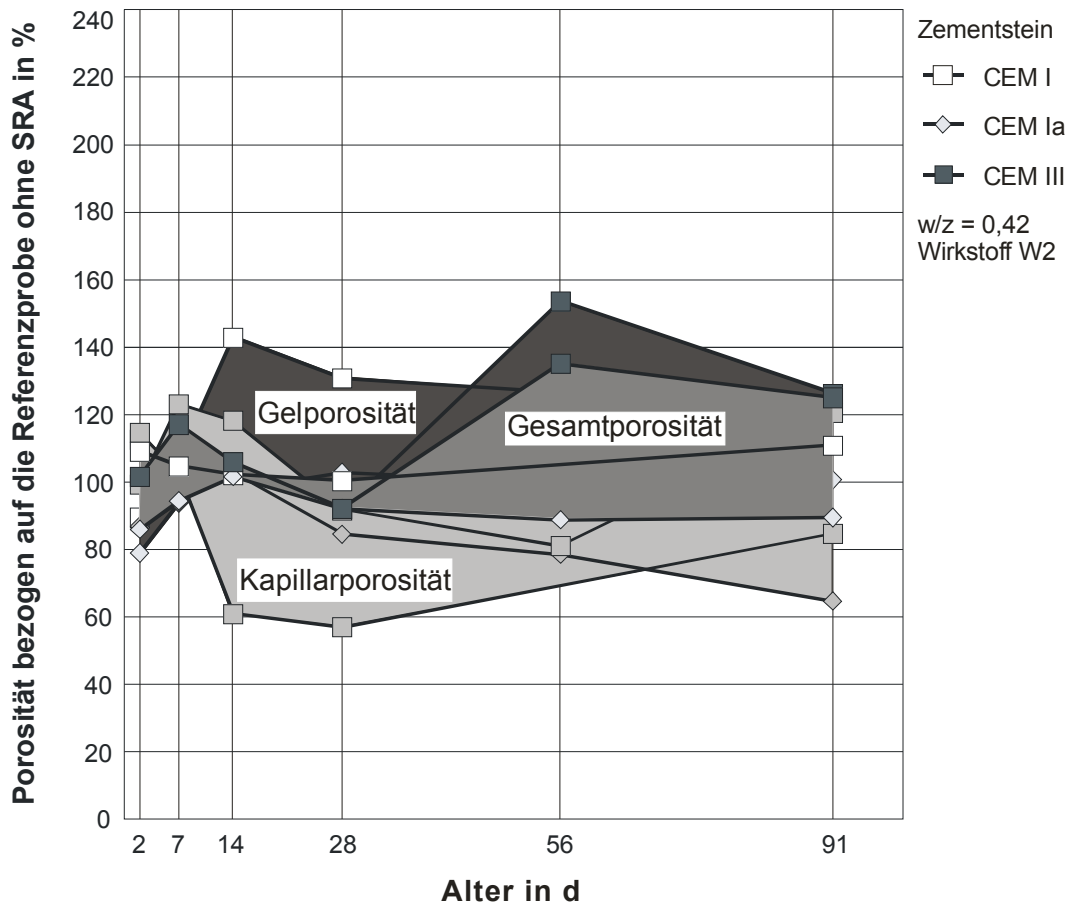


Bild 5-27 Einfluss des Wirkstoffs W2 auf die Porosität der Zementsteine mit CEM I, CEM Ia und CEM III mit $w/z = 0,42$; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

Der Einfluss des Wirkstoffs W2 auf die Porosität von Zementstein CEM I bei $w/z = 0,25$ ist in Bild B-22, Anhang B, dargestellt. Ähnlich wie der Wirkstoff W1 wurde die Gesamtporosität kaum beeinflusst, die Anteile an Gelporen nahmen zu und die Anteile an Kapillarporen nahmen ab.

5.3.4.7 Schlussfolgerungen

Durch den Schwindreduzierer SRA3 wurden in Bezug auf die jeweiligen Referenzproben die Anteile an Gelporen erhöht und die Anteile an Kapillarporen verringert. Die Gesamtporosität verringerte sich geringfügig. Diese Veränderung der Porenradienverteilung ist im Wesentlichen auf die Wirkung des darin enthaltenen Wirkstoffs W1 zurückzuführen. Das zeigen exemplarische Untersuchungen an den Zementsteinen, CEM I, CEM Ia und CEM III. Die Veränderungen, die durch den Wirkstoff W2 hervorgerufen wurden, waren im Vergleich dazu gering.

Trotz einer zum Teil sehr starken Verfeinerung des Porensystems, reduzierte Schwindreduzierer SRA3 das autogene Schwinden aller untersuchten Zementsteine deutlich. Ebenso führte der Wirkstoff W1 zu einer starken Verfeinerung des Porensys-

tems, was jedoch nicht immer mit einer guten schwindreduzierenden Wirkung verbunden war. Während die Reduzierung des autogenen Schwindens von Zementstein CEM Ia mit dem von Zementstein CEM I durch W1 vergleichbar war, war die Schwindreduzierung von Zementstein CEM III durch W1 deutlich schlechter. Ein Zusammenhang zwischen der Verfeinerung des Porensystems und der Abnahme der schwindreduzierenden Wirkung konnte somit nur zum Teil ermittelt werden. Wirkstoff W2, der die Porenradienverteilung der Zementstein in geringerem Maße beeinflusste, reduzierte das autogene Schwinden aller untersuchten Zementsteine signifikant.

Worauf die Verfeinerung des Porensystems, insbesondere durch Wirkstoff W1, zurückzuführen ist, konnte nicht abschließend geklärt werden. Der geringe Einfluss der SRA auf die Konsistenz und den Luftgehalt der Zementleime ließ einen Einfluss daraus auf die Porenstruktur nicht vermuten. Möglicherweise hat die herabgesetzte Oberflächenspannung der Porenlösung einen Einfluss auf die Ausbildung des Porensystems während der Erhärtung. Ein systematischer Einfluss der Molekülstruktur der SRA und Wirkstoffe ließ sich aus den Untersuchungsergebnissen nicht ableiten.

5.3.5 Innere relative Feuchte von Zementstein

5.3.5.1 Allgemeines

Vor dem Hintergrund, dass das autogene Schwinden im Wesentlichen auf eine innere Austrocknung des Zementsteins infolge fortschreitender Hydratation zurückzuführen ist, wurde die innere relative Feuchte (r. F.) in Zementsteinproben mit Wasserzementwerten von $w/z = 0,42$ und $w/z = 0,25$ mit und ohne schwindreduzierende Zusatzmittel bestimmt. Die innere relative Feuchte von Zementstein wurde mit Feuchtesensoren, die im Alter von 24 Stunden in den Zementstein eingeführt wurden, an jeweils mindestens zwei Proben ermittelt. Das Messsystem ist in Abschnitt 4.3.4.6 beschrieben.

5.3.5.2 Zementstein ohne schwindreduzierende Zusatzmittel

Die Messergebnisse der inneren relativen Feuchte in Zementstein mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,42$ sind in Bild 5-28 dargestellt. Die relative Feuchte betrug zu Messbeginn im Alter von 24 Stunden rd. 97,3 % (CEM Ia) bis rd. 99,9 % (CEM I-HS). Die Differenz zu 100 % ist zum Einen auf eine innere Selbstaustrocknung durch die beginnende Hydratation bereits innerhalb der ersten 24 Stunden zurückzuführen. Zum Anderen können gelöste Alkalihydroxide den Dampfdruck über der Porenlösung herabsetzen und eine Luftfeuchtigkeit verschieden von 100 % r. F. hervorrufen [Lur 03, Jen 96]. Diese Annahme wird durch die Messergebnisse bestätigt. Zementstein CEM Ia, der durch die Aufdotierung mit KOH die meisten Alkalien in der Porenlösung enthielt, wies im Alter von 24 Stunden die geringste relative Feuchte auf. Zementstein CEM I-HS dagegen wies die geringste Alkaliionenkonzentration in der Porenlösung und die höchste innere relative Feuchte im Alter von 24 Stunden auf.

Die innere relative Feuchte von den Zementsteinen CEM I, CEM Ia und CEM II nahm mit fortschreitender Hydratation bis zu einem Alter von 14 Tagen erwartungsgemäß ab.

Zu diesem Zeitpunkt hatte sich auf Grund der konservierenden Lagerung in den Zementsteinen die Ausgleichsfeuchte eingestellt, die sich bis zu einem Alter von 91 Tagen nicht mehr wesentlich veränderte. Die innere relative Feuchte der Zementsteine im Alter von 91 Tagen ist in Tabelle 5-2 angegeben.

Der Zementstein mit Hochhofenzement CEM III stand im Vergleich zu den übrigen Zementsteinen erst im Alter von 56 Tagen im Gleichgewicht. In diesem Zementstein wurde im Alter von 91 Tagen die geringste relative Feuchte bestimmt (s. auch Tabelle 5-2). Dies ist vermutlich auf die fortlaufende Reaktion des Hüttensandes und die dadurch zunehmende Einbindung von freiem Wasser in Hydratphasen zurückzuführen. Ähnlich wie Zementstein CEM III stellte sich auch in Zementstein CEM I-HS erst im Alter von 91 Tagen die Ausgleichsfeuchte ein.

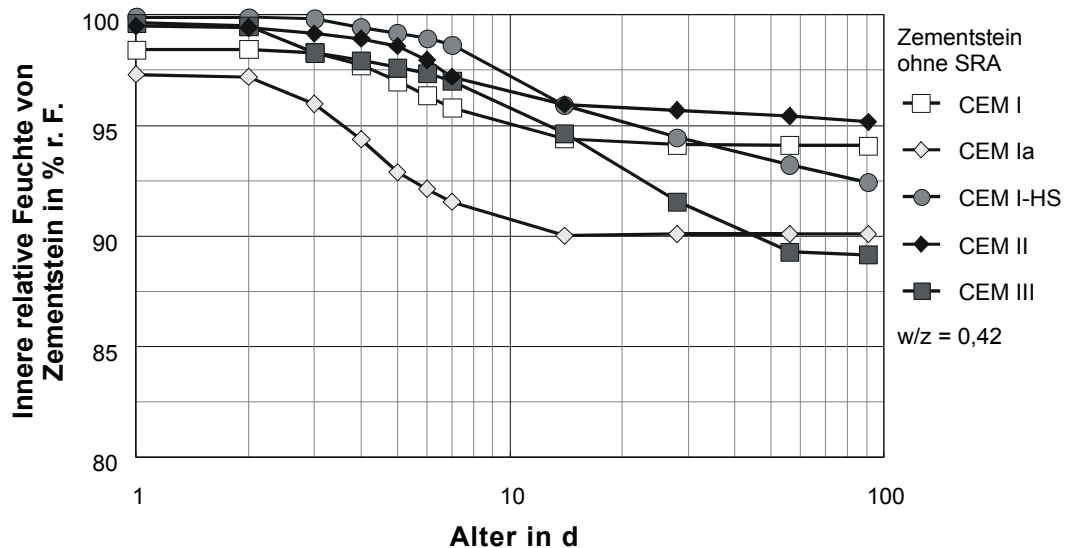


Bild 5-28 Innere relative Feuchte der Zementsteine CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III mit $w/z = 0,42$ ohne SRA

Der Einfluss der Absenkung des Wasserzementwerts auf $w/z = 0,25$ auf die innere relative Feuchte in Zementstein wurde exemplarisch mit CEM I untersucht. Die innere relative Feuchte im Alter von 91 Tagen geht aus Tabelle 5-2 hervor. Der Verlauf der inneren relativen Feuchte mit $w/z = 0,25$ ist in Bild 5-30 dargestellt.

5.3.5.3 Einfluss von SRA auf die innere relative Feuchte von Zementstein

Der Einfluss der Schwindreduzierer SRA1 und SRA3 bzw. der Wirkstoffe W1 und W2 auf die innere relative Feuchte von Zementstein wurde an Zementstein mit CEM I mit Wasserzementwerten von $w/z = 0,42$ bzw. $w/z = 0,25$ untersucht. Darüber hinaus wurde der Einfluss von SRA3 auf die relative Feuchte in Zementsteinen mit Zementen CEM Ia (Bild B-23, Anhang B), CEM I-HS (Bild B-24, Anhang B), CEM II (Bild B-25, Anhang B) und CEM III (Bild B-26, Anhang B) mit einem Wasserzementwert von

$w/z = 0,42$ ermittelt. Bei gleichem Wasserzementwert wurde ergänzend dazu der Einfluss der Wirkstoffe W1 und W2 auf die innere Feuchte der Zementsteine CEM Ia (Bild B-23, Anhang B) und CEM III (Bild B-26, Anhang B) bestimmt.

Der Einfluss der Schwindreduzierer SRA1, SRA3 sowie der Wirkstoffe W1 und W2 auf die innere relative Feuchte von Zementstein mit CEM I mit $w/z = 0,42$ ist in Bild 5-29 dargestellt. Die innere relative Luftfeuchte im Zementstein CEM I mit den Schwindreduzierern bzw. Wirkstoffen lag im gesamten Untersuchungszeitraum (91 Tage) über der relativen Luftfeuchte der Referenzprobe ohne SRA. Aus dem Bild geht hervor, dass durch die Schwindreduzierer SRA1 und SRA3 sowie den Wirkstoff W2 die innere relative Feuchte im Zementstein im Vergleich zur Referenzprobe über den Zeitraum von 91 Tagen größer als 98 % r. F. war. Mit Wirkstoff W1 sank die Feuchte zwischen sechs und 56 Tagen von rd. 99 % auf rd. 95 % r. F. ab und verändert sich bis zum Alter von 91 Tagen nicht mehr.

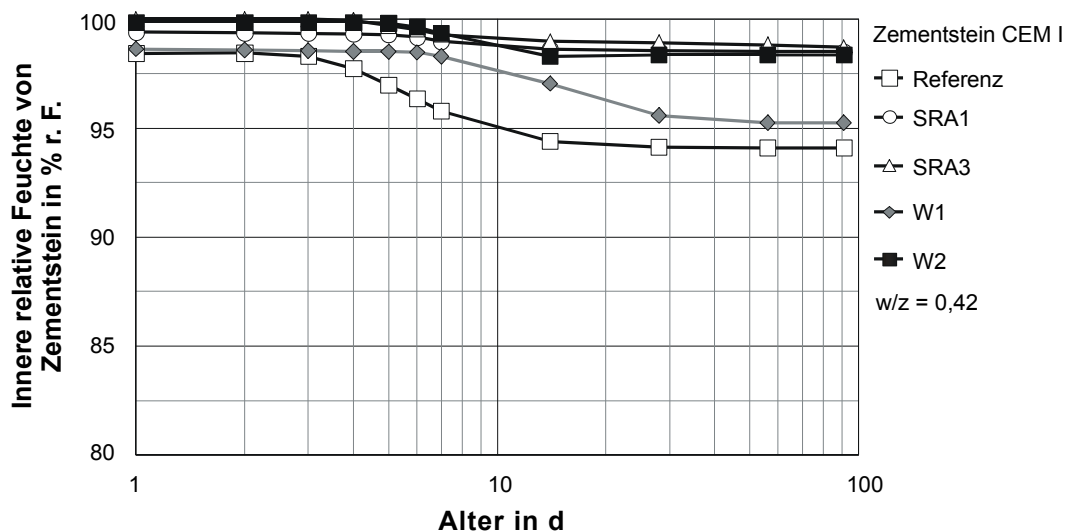


Bild 5-29 Innere relative Feuchte von Zementstein CEM I mit $w/z = 0,42$; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

Bei Absenkung des Wasserzementwerts auf $w/z = 0,25$ ergab sich der in Bild 5-30 dargestellte Verlauf der inneren relativen Feuchte. Im Alter von 24 Stunden betrug die innere relative Feuchte der Referenzprobe rd. 90 % r. F. Mit W1 bzw. W2 wurden rd. 92 % bzw. rd. 98 % r. F. ermittelt. Die Feuchte in der Referenzprobe ohne SRA verringerte sich bis zu einem Alter von sechs Tagen auf rd. 81 % r. F. und veränderte sich bis zu einem Alter von 91 Tagen nicht mehr wesentlich. Die Feuchte des Zementsteins mit Wirkstoff W1 nahm ebenfalls bis zum Alter von sechs Tagen ab. Die Ausgleichsfeuchte betrug rd. 87 % r. F. und änderte sich bis zum Alter von 91 Tagen nicht mehr wesentlich. Mit Wirkstoff W2 nahm die innere relative Feuchte bis zum Alter von 91 Tagen nahezu kontinuierlich auf rd. 94 % r. F. ab. Die jeweilige relative Feuchte im Alter von 91 Tagen ist in Tabelle 5-2 angegeben. Wie auch in Zementstein mit $w/z = 0,42$ war die

relative Feuchte in Zementstein mit den SRA-Wirkstoffen zu jedem Zeitpunkt größer als bei der Referenzprobe ohne SRA.

Tabelle 5-2 Innere relative Luftfeuchte in konserviert gelagertem Zementstein im Alter von 91 Tagen

w/z	Zementstein	Innere relative Feuchte von Zementstein in % r. F.				
		Referenz o. SRA	Schwindreduzierer bzw. Wirkstoffe			
			SRA1	SRA3	W1	W2
1	2	3	4	5	6	7
0,25	CEM I	81	n. b.	n. b.	87	94
0,42	CEM I	94	99	99	96	98
	CEM Ia	90	n. b.	97	93	98
	CEM I-HS	93	n. b.	99	n. b.	n. b.
	CEM II	96	n. b.	99	n. b.	n. b.
	CEM III	89	n. b.	96	91	96

n. b.: nicht bestimmt

In Bild B-23 bis Bild B-26, Anhang B, sind die relativen Feuchten der Zementsteine CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III ohne und mit Schwindreduzierer bzw. Wirkstoffen dargestellt. Mit Ausnahme des Zementsteins CEM I-HS waren im Alter von 24 Stunden die Feuchten in den Zementsteinen mit SRA3 stets höher als die der jeweiligen Referenzprobe. In den Zementsteinen CEM I-HS (Bild B-24, Anhang B) und CEM II (Bild B-25, Anhang B) veränderte sich bei Verwendung von SRA3 die Feuchte bis zu einem Alter von 91 Tagen nicht wesentlich. In Zementstein CEM Ia (Bild B-23, Anhang B) nahm sie bis zum Alter von 91 Tagen auf rd. 97 % r. F. ab. In Zementstein CEM III mit Hochofenzement (Bild B-26, Anhang B) wurde bei Verwendung von SRA3 dagegen eine Abnahme der Feuchte auf rd. 96 % r. F. festgestellt. Der Verlauf lässt vermuten, dass die Feuchte über das Alter von 91 Tagen hinaus noch weiter abnimmt.

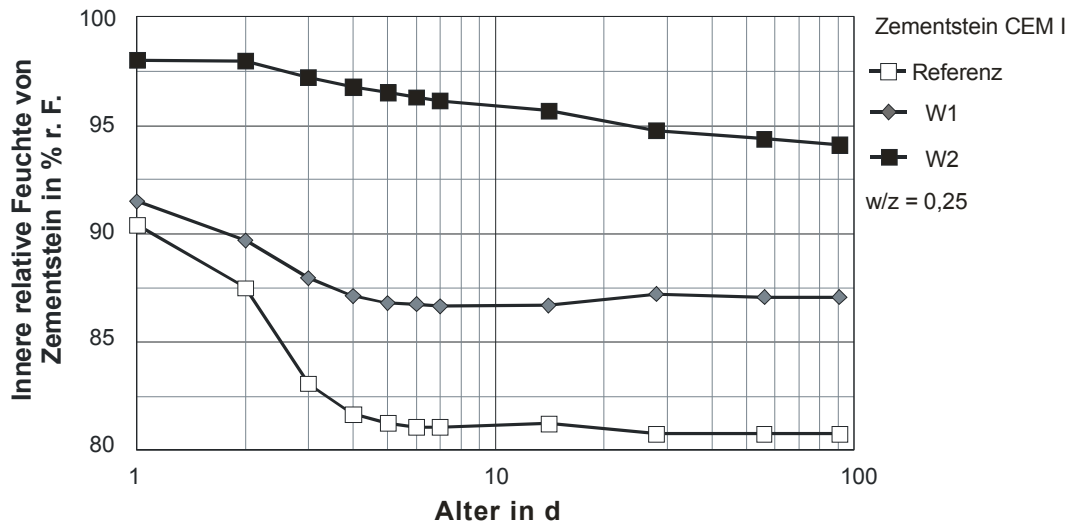


Bild 5-30 Innere relative Feuchte von Zementstein CEM I mit $w/z = 0,25$; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

Die Ergebnisse der Feuchtemessungen mit W1 und W2 in Zementstein CEM Ia bzw. CEM III sind in Bild B-23 bzw. in Bild B-26, Anhang B, dargestellt. Mit Wirkstoff W2 wurde in beiden Zementsteinen ein ähnlicher Verlauf der relativen Feuchte festgestellt wie mit Schwindreduzierer SRA3. Der Wirkstoff W1 dagegen wies im Zementstein CEM Ia im Alter von 24 Stunden eine geringere Feuchte auf als die Referenzprobe ohne SRA. Nach drei Tagen war die Feuchte größer als in der Referenzprobe. Im Zementstein CEM III mit Wirkstoff W1 nahm die Feuchte nach zwei Tagen ab und betrug im Alter von 91 Tagen rd. 91 % r. F. Aus dem Verlauf der Kurve lässt sich schließen, dass die Gleichgewichtsfeuchte des Zementsteins in diesem Alter noch nicht erreicht war. Möglicherweise nimmt die Feuchte mit zunehmendem Alter weiter ab. Im Vergleich zum Schwindreduzierer SRA3 und Wirkstoff W2 war die Feuchte in den Zementsteinen CEM Ia und CEM III mit Wirkstoff W1 jeweils geringer, aber höher als in der jeweiligen Referenz. Die jeweilige innere relative Feuchte im Alter von 91 Tagen ist in Tabelle 5-2 dargestellt.

5.3.5.4 Zusammenhang zwischen innerer relativer Feuchte und autogenem Schwinden

Die Ergebnisse zeigen, dass die innere relative Feuchte von Zementstein mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,42$ ohne SRA mit fortschreitender Hydratation auf Grund innerer Selbst austrocknung abnahm. Die Ausgleichsfeuchte stellte sich im Alter zwischen 14 und 56 Tagen ein und war von der Zementart abhängig (s. Bild 5-28). Die höchste Ausgleichsfeuchte mit rd. 96 % r. F. wurde in Portlandkalksteinzementstein CEM II ermittelt. Im Hochofenzementstein CEM III stellte sich nach 91 Tagen mit rd. 89 % r. F. die geringste Ausgleichsfeuchte ein. Dieser Zementstein wies die geringsten autogenen Schwindverformungen auf (s. Bild 5-8). Es stellt sich folglich die Frage, welcher Zusammenhang zwischen Selbst austrocknung und innerer relativer Luftfeuchte besteht.

Aus Bild 5-31 geht hervor, dass eine gute Korrelation zwischen autogenem Schwinden (Ordinate) und der inneren relativen Luftfeuchte (Abszisse) von Zementstein mit $w/z = 0,42$ besteht. Diese Korrelation ist jedoch von der Zementart abhängig. So war das autogene Schwinden des Portlandzementsteins CEM Ia bei gleicher relativer Luftfeuchte größer als bei HS-Portlandzementstein CEM I-HS und Hochofenzementstein CEM III. Im Vergleich zum Zementstein CEM I-HS wurde bei Portlandzementstein CEM I und Portlandkalksteinzementstein CEM II eine stärkere Zunahme des autogenen Schwindens bei vergleichbarer Abnahme der relativen Luftfeuchte festgestellt.

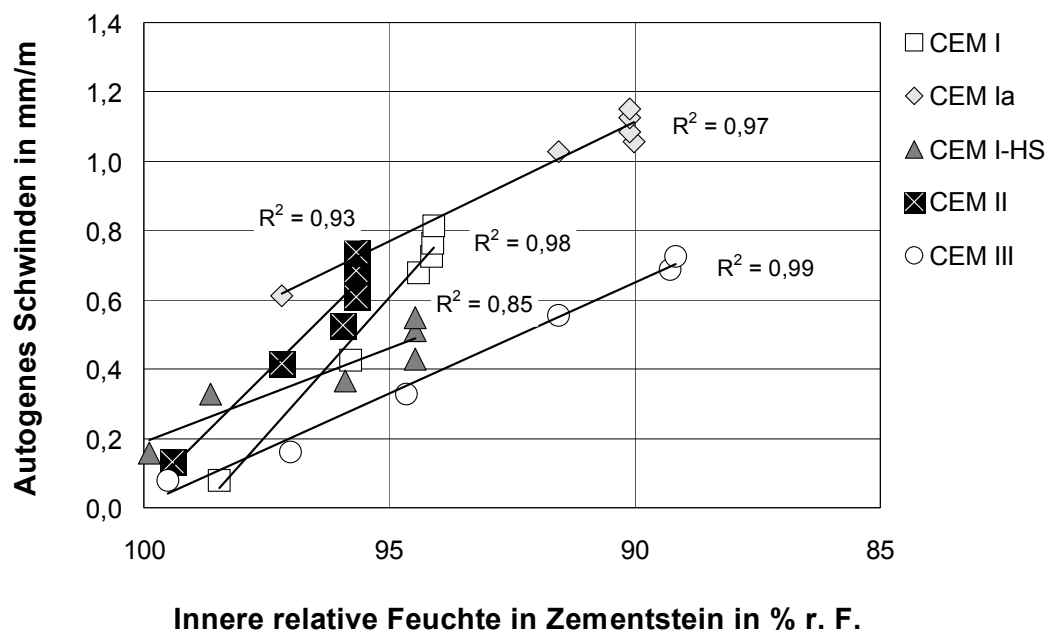


Bild 5-31 Zusammenhang zwischen innerer relativer Feuchte und autogenem Schwinden von Zementstein mit $w/z = 0,42$ ohne SRA

Die Korrelation zwischen innerer relativer Feuchte und autogenem Schwinden von Zementsteinproben mit $w/z = 0,42$ und mit Schwindreduzierer SRA3 ist in Bild 5-32 dargestellt. Die Ordinate und die Abszisse in der Grafik sind im Vergleich zu Bild 5-31 größer aufgelöst, da die autogenen Verformungen geringer und die inneren relativen Luftfeuchten höher waren.

Aus dem Bild geht hervor, dass im Vergleich zu Zementsteinen ohne SRA die Korrelation zwischen innerer relativer Feuchte und autogener Schwindverformung geringer ausgeprägt war.

Ein Vergleich des Anstieges der Korrelationsgeraden der Proben mit SRA3 mit den Korrelationsgeraden der jeweiligen Referenzproben ohne SRA, führt zu dem Schluss, dass bei gleicher innerer relativer Feuchte in den Proben mit SRA ein größeres autogenes Schwinden auftrat als in den Referenzproben ohne SRA. Bei dieser Schlussfolge-

rung muss berücksichtigt werden, dass sowohl das autogene Schwinden als auch die Entwicklung der inneren relativen Feuchte von der Zeit abhängig sind. Ein Rückschluss des Einflusses der relativen Feuchte (verändert durch SRA) auf das autogene Schwinden anhand von Bild 5-31 und Bild 5-32 ist aus diesem Grund nicht zielführend.

Da sich die innere relative Feuchte auf Grund der konservierenden Lagerung durch SRA3 in den meisten Fällen nicht wesentlich änderte, kann man davon ausgehen, dass deren Einfluss auf das autogene Schwinden der Zementsteine CEM I, CEM Ia, CEM I-HS und CEM II gering ist. Gleiches galt erwartungsgemäß auch für den Wirkstoff W2, da durch den Wirkstoff das autogene Schwinden und auch die innere relative Feuchte ähnlich wie durch Schwindreduzierer SRA3 beeinflusst wurde. Abweichend davon hatte die relative Feuchte im Zementstein CEM III einen etwas größeren Einfluss auf das untersuchte autogene Schwinden, wenngleich das absolute autogene Schwinden hier eher gering war.

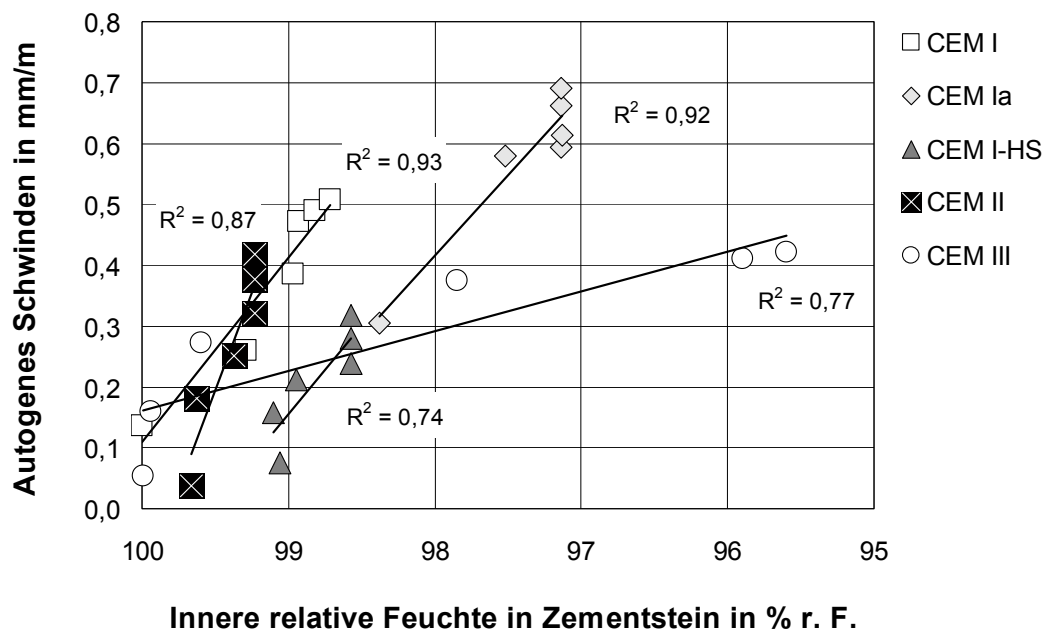


Bild 5-32 Zusammenhang zwischen innerer relativer Feuchte und autogenem Schwinden von Zementstein mit $w/z = 0,42$ und mit Schwindreduzierer SRA3, Dosierung: 4,5 M.-% v. w

5.3.5.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Durch die Zugabe der SRA (SRA1, SRA3, W1 und W2) stellte sich in den Zementsteinen eine höhere Ausgleichsfeuchte ein als in den jeweiligen Referenzproben ohne Schwindreduzierer. Die innere relative Feuchte war bei einem Wasserzementwert von $w/z = 0,42$ unter konservierenden Lagerungsbedingungen, in Abhängigkeit von der Zementart, im Alter von 91 Tagen um bis zu 8 % r. F. größer als in der jeweiligen Referenzprobe (W2 und CEM Ia in Tabelle 5-2). In Zementstein CEM I mit $w/z = 0,25$ war

die Differenz zur Referenzprobe mit dem gleichen Wirkstoff noch größer und betrug rd. 14 % r. F. Diese Ergebnisse stehen in guter Übereinstimmung mit Ergebnissen von [Ben 01a]. Bentz et al. führten die erhöhte innere relative Feuchte auf die geringere Oberflächenspannung der Porenlösung mit SRA zurück. Diese Annahme kann mit Hilfe der Zusammenhänge, die in der Kelvingleichung beschrieben sind (s. Abschnitt 5.3.6.1, Gleichung 7), erklärt werden. Danach stellt sich unter der Voraussetzung gleicher Porenradienverteilung und gleichem molaren Volumen der Porenlösung über Menisken mit flacherer Krümmung bedingt durch die geringere Oberflächenspannung der Porenlösung (mit SRA), eine höhere relative Feuchte ein, als über Menisken mit größerer Krümmung (ohne SRA).

In [AiF 06] wurde festgestellt, dass die Wasserabgabe von Zementsteinprismen im Klima 20/65 bei Austrocknungsbeginn um bis zu 25 % größer war als bei Referenzproben ohne SRA. Dies kann auf die erhöhte Verdunstung von Wasser an die Umgebung zurückgeführt werden und bestätigt die dargestellten Ergebnisse. Die erhöhte Wasserabgabe der Zementsteine mit SRA ist u. a. auf das verfeinerte Porensystem zurückzuführen, da über Flüssigkeitsmenisken in Poren mit kleineren Radien bei gleicher Fläche mehr Wasser verdunstet als über Flüssigkeitsmenisken in Poren mit größeren Radien [Man 60].

5.3.6 Übergreifende Zusammenhänge

5.3.6.1 Allgemeines

In den folgenden Abschnitten werden übergreifende Zusammenhänge zwischen den in den vorangegangenen Abschnitten analysierten Eigenschaften (autogenes Schwinden, Porenradienverteilung und innere relative Feuchte von Zementstein) diskutiert.

In Abschnitt 5.3.2.1 wurde gezeigt, dass die Oberflächenspannung der Porenlösung durch Schwindreduzierer herabgesetzt wird. Vor dem Hintergrund, dass durch die herabgesetzte Oberflächenspannung der Kapillardruck des Kapillarporenwassers verringert wird (s. Abschnitt 2.4.4.2 und [Sat 83]) wurde der Kapillardruck im Zementstein berechnet. Näherungsweise kann mit Kenntnis der Oberflächenspannung der Porenlösung und des Porenradius die Kapillarspannung mit der Young-Laplace-Gleichung wie folgt berechnet werden:

$$\Delta P = \frac{2 \cdot \gamma}{r} \quad \text{Gleichung 6}$$

mit:

ΔP der Kapillarspannung [MPa]

γ die Oberflächenspannung der Porenlösung [N/m]

r der Porenradius [m].

Unter konservierenden Bedingungen sind große Teile des Porenraums des Zementsteins noch mit Wasserdampf gesättigt und nur ein kleiner Teil der vorhandenen Poren durch die Selbstaustrocknung entleert. Für die Berechnung der Kapillarspannung sind die Porenradien von Interesse, die während der Selbstaustrocknung tatsächlich entleert werden und zur Ausbildung kapillarer Zugkräfte beitragen können. Der Porenradius, bis zu dem die Poren durch Selbstaustrocknung entleert werden kann, wird im Folgenden *Sättigungsradius* genannt.

Poren, deren Größe dem Sättigungsradius entspricht, stehen mit der relativen Feuchte zum Zeitpunkt (t) im Gleichgewicht. Da bei der inneren Selbstaustrocknung Poren der Größe nach, mit dem größten Porenradius beginnend, entleert werden, sind Poren mit kleineren Radien als dem Sättigungsradius zum Zeitpunkt (t) noch wasserdampfgesättigt, d.h. mit Porenwasser gefüllt. Unter Annahme des zylindrischen Porenmodells bewirkt die Oberflächenspannung in diesen Poren eine oberflächige Krümmung der Porenlösung. Dabei stellt sich über den gekrümmten Oberflächen, auch Menisken genannt, ein höherer Sättigungsdampfdruck ein als über einer ebenen Flüssigkeitsoberfläche.

Der Zusammenhang zwischen relativer Feuchte, Oberflächenspannung und Porenradius ist in der Kelvin-Gleichung beschrieben. Der Sättigungsradius kann mit Hilfe von Gleichung 7 wie folgt berechnet werden:

$$r(t) = \frac{-2 \cdot \gamma_{PL}(t) \cdot V_{m,PL}(t)}{\ln\left(\frac{r \cdot F(t)}{100 \%}\right) \cdot R \cdot T} \quad \text{Gleichung 7}$$

mit:

$r(t)$	Sättigungsradius zum Zeitpunkt (t) [m]
$\gamma_{PL}(t)$	Oberflächenspannung der Porenlösung zum Zeitpunkt (t) [N/m]
$V_{m,PL}(t)$	Molares Volumen der Porenlösung zum Zeitpunkt (t) [m³/mol]
$r \cdot F(t)$	Innere relative Feuchte zum Zeitpunkt (t) [% r. F.]
R	Allgemeine Gaskonstante [8,314 J/mol·K]
T	Absolute Temperatur [293,15 K]
(t)	Zeitpunkte 1 ^{*)} , 2, 7, 14, 28, 56 und 91 Tage
*) gilt nur für w/z = 0,25	

5.3.6.2 Sättigungsradius

Der jeweilige Sättigungsradius $r(t)$, bei dem die Zementsteine mit der relativen Feuchte im Gleichgewicht standen, wurde nach Gleichung 7 berechnet. Die Eingangsparameter für die jeweiligen Mischungszusammensetzungen und die jeweiligen Untersuchungszeitpunkte sind in Tabelle A-17, Spalte 4 bis 6, Anhang A, angegeben.

Zur Berechnung wurden die Messwerte der Oberflächenspannung der jeweiligen Porenlösung (SRA) zu den jeweiligen Zeitpunkten (t) in Gleichung 7 eingesetzt (siehe Abschnitt 5.3.2.1). Da zu den Zeitpunkten 14 Tage bzw. 56 Tage keine Oberflächenspannung der Porenlösung bestimmt wurde, wurden die entsprechende Oberflächenspannung aus den Werten 28 d und 91 d linear interpoliert. Das gleiche Vorgehen wurde auch für die Bestimmung der SRA-Konzentration zu diesen Zeitpunkten angewendet. Die daraus entstehende Ungenauigkeit bei den Berechnungen ist gering, da sich die Oberflächenspannung bzw. die SRA-Konzentration in der Porenlösung in diesem Alter nur noch geringfügig änderte.

Das molare Volumen der Porenlösung $V_{m,PL}$ war von der Zusammensetzung der Porenlösung abhängig und veränderte sich durch die Schwindreduzierer und Wirkstoffe. Das molare Volumen wurde aus der SRA-Konzentration in der jeweiligen Porenlösung (siehe Abschnitt 5.3.2.2) berechnet und in Gleichung 7 eingesetzt. Für die Porenlösung der Referenzproben ohne SRA, wurde näherungsweise das molare Volumen von Wasser angenommen, da die Konzentration an gelösten Alkalien in der Porenlösung das molare Volumen nur gering beeinflusste.

$$V_{m,PL}(t) = x \cdot V_{m,SRA}(t) + (1-x) \cdot V_{m,H2O}(t) \quad \text{Gleichung 8}$$

mit:

$V_{m,PL}(t)$	Molares Volumen der Porenlösung zum Zeitpunkt (t) [m ³ /mol]
x	Konzentration der SRA in der Porenlösung [M.-% v. PL]
$V_{m,SRA}(t)$	Molares Volumen der Schwindreduzierer bzw. Wirkstoffe [m ³ /mol]
$V_{m,H2O}(t)$	Molares Volumen von Wasser [m ³ /mol]
(t)	Zeitpunkte 1 ^{*)} , 2, 7, 14, 28, 56 und 91 Tage
	*) gilt nur für w/z = 0,25

Da aus Zementsteinproben mit einem Wasserzementwert von w/z = 0,25 keine Porenlösung gewonnen werden konnte, wurden die Oberflächenspannungen und die molaren Volumina der entsprechenden Proben mit w/z = 0,42 für die Berechnungen herangezogen.

Die Sättigungsradien sind am Beispiel der Zementsteine CEM I mit w/z = 0,42 bzw. w/z = 0,25 in Abhängigkeit von der Zeit in Bild 5-33 bzw. Bild 5-34 dargestellt. Aus den Bildern geht hervor, dass der Sättigungsradius der jeweiligen Referenzprobe ohne SRA zu jedem Zeitpunkt kleiner war als bei den Proben mit SRA. D. h. der Zementstein stand bei geringeren Porenradien im Gleichgewicht mit der jeweiligen relativen Feuchte. Besonders im Alter von einem und zwei Tagen war die jeweilige Differenz zwischen Referenzprobe und Zementstein mit SRA sehr groß.

In den übrigen untersuchten Zementsteinen CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III waren die Unterschiede der Sättigungsradien zwischen der jeweiligen Referenzprobe

und der Probe mit Schwindreduzierer SRA3 mit den Werten von Portlandzementstein CEM I vergleichbar. (s. Bild B-27 bis Bild B-30, Anhang B).

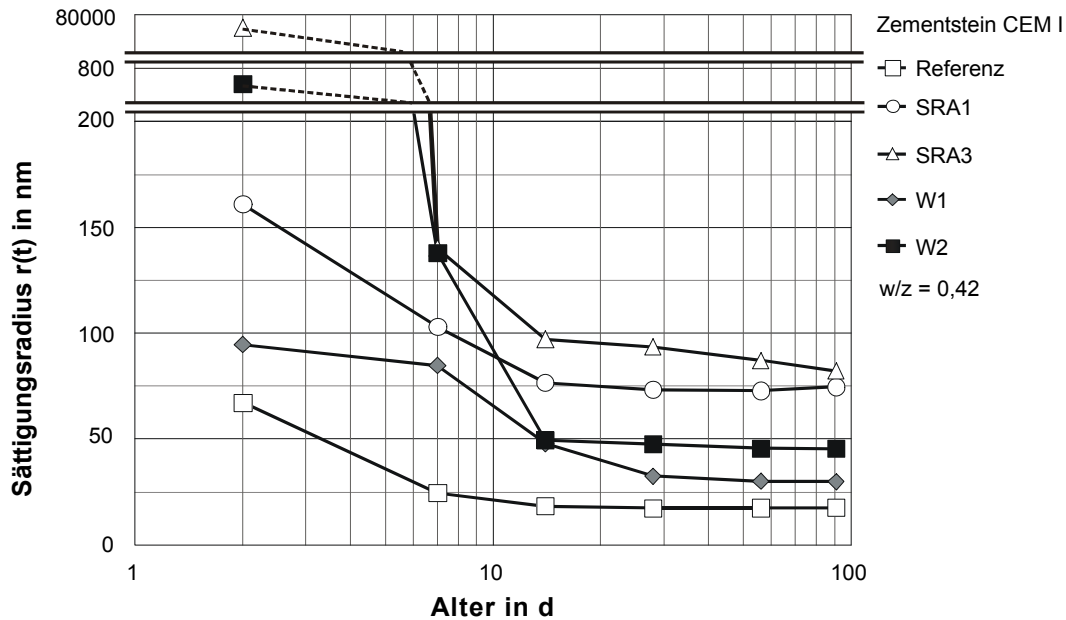


Bild 5-33 Sättigungsradien in Portlandzementstein CEM I mit $w/z = 0,42$; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

Folgende Eigenschaften des Zementsteins bzw. der Porenlösung tragen dazu bei, dass die Sättigungsradien in Zementstein mit SRA größer waren als in den Referenzproben ohne SRA.

- Höhere innere relative Feuchte im Zementstein
- Höheres molares Volumen der Porenlösung

Dabei hat die erhöhte relative Luftfeuchte im Zementstein den größeren Einfluss auf den Sättigungsradius. Da bei den Proben mit Wirkstoff W1 sowohl mit $w/z = 0,42$ als auch mit $w/z = 0,25$ die jeweilige relative Feuchte im Vergleich zu den übrigen SRA geringer war, wurden bei diesem Wirkstoff auch die kleinsten Sättigungsradien ermittelt. Die geringere Oberflächenspannung wirkt einer Vergrößerung des Sättigungsradius geringfügig entgegen. Dieser Einfluss wurde jedoch durch die erhöhte innere relative Feuchte kompensiert.

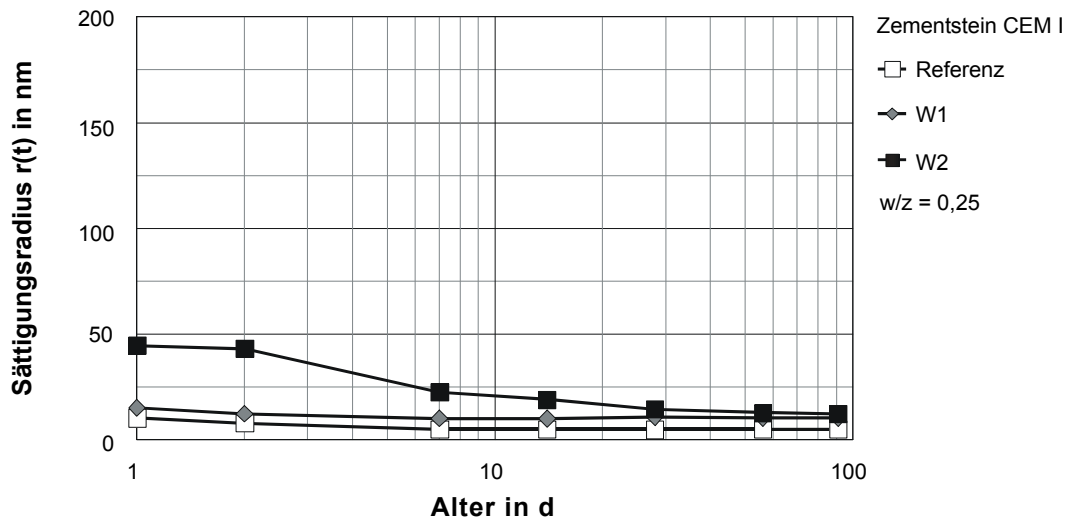


Bild 5-34 Sättigungsradien in Portlandzementstein CEM I mit $w/z = 0,25$; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

5.3.6.3 Wirksamer Porenanteil

In Abschnitt 5.3.4 wurde dargestellt, dass sich das Porengefüge von Zementstein durch die verwendeten Schwindreduzierer und Wirkstoffe verfeinerte. Dadurch muss folglich auch die innere Austrocknung von Zementstein während der Hydratation beeinflusst werden.

Durch Selbstaustrocknung werden nur Poren entleert, deren Radius größer ist als die in Abschnitt 5.3.6.2 ermittelten jeweiligen Sättigungsradien. Bei diesem Radius steht der Zementstein mit einer bestimmten relativen Luftfeuchte im Gleichgewicht. In Poren, die durch Selbstaustrocknung entleert werden, können kapillare Zugkräfte in der Porenlösung auftreten. Bezogen auf den jeweiligen gesamten Porenraum des Zementsteins wird dieser Anteil im Folgenden als *wirksamer Porenanteil* bezeichnet.

Der wirksame Porenanteil wurde wie folgt berechnet:

$$V_{P,wirk}(t) = (V_{P,r}(t) / V_{P,ges}(t)) \cdot 100 \% \quad \text{Gleichung 9}$$

mit:

$V_{P,wirk}(t)$ Wirksamer Porenanteil bezogen auf das Gesamtporenvolumen des Zementsteins zum Zeitpunkt (t) [-]

$V_{P,r}(t)$ Porenvolumen der nach Abschnitt 4.3.4.5 getrockneten Probe mit Radien größer/gleich dem Sättigungsradius zum Zeitpunkt (t) [mm^3/g]

$V_{P,ges}(t)$ Gesamtporenvolumen der nach Abschnitt 4.3.4.5 getrockneten Probe [mm^3/g]

(t) Zeitpunkte 1^{*)}, 2, 7, 14, 28, 56 und 91 Tage

*) gilt nur für $w/z = 0,25$

Das Gesamtporenvolumen sowie die Volumenanteile der Poren, deren Radius dem jeweiligen Sättigungsradius entspricht, wurden aus den Daten der Quecksilberintrusionsmessungen ermittelt.

Der wirksame Porenanteil des Zementsteins CEM I mit $w/z = 0,42$ bzw. $w/z = 0,25$ zu den Zeitpunkten 1, 2, 7, 14, 28, 56 und 91 Tagen ist in Bild 5-35 bzw. in Bild 5-36 dargestellt. In Bild 5-35 wird deutlich, dass im Alter von 28 bis 91 Tagen rd. 15 % des Gesamtporenvolumens der Referenzprobe durch Selbst austrocknung entleert wurden (d.h. der Sättigungsdampfdruck in diesen Porenanteil ist kleiner als 100 % r. F.). Bedingt durch größere Sättigungsradien und feinere Porensysteme war der wirksame Porenanteil der Proben mit SRA geringer als bei der Referenzprobe ohne Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff.

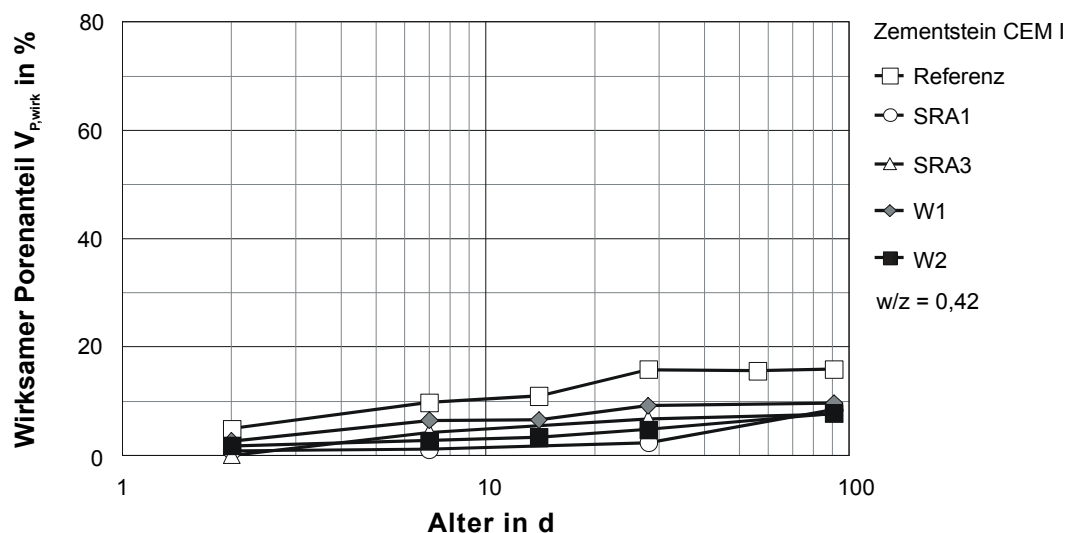


Bild 5-35 Durch Selbst austrocknung wirksamer Porenanteil in Portlandzementstein CEM I mit $w/z = 0,42$; Dosierung von SRA1, SRA3, W1 und W2: 4,5 M.-% v. w

Aus Bild 5-36 geht hervor, dass beim niedrigeren Wasserzementwert von $w/z = 0,25$ der wirksame Porenanteil der Referenzprobe im Vergleich zu $w/z = 0,42$ deutlich größer ist. In der Referenzprobe ohne SRA wurden ab einem Alter von 14 Tagen rd. 70 % des Gesamtporenvolumens durch innere Selbst austrocknung entleert (d.h. der Sättigungsdampfdruck in diesem Porenanteil ist kleiner als 100 % r. F.). Im Gegensatz dazu ist der wirksame Porenanteil der Proben mit W1 und W2 mit maximal rd. 20 % deutlich kleiner. Grund dafür ist zum einen der größere Sättigungsradius insbesondere aber auch das verfeinerte Porensystem des Zementsteins. Von den in dieser Arbeit untersuchten Schwindreduzieren und Wirkstoffen wiesen die Proben mit Wirkstoff W1 sowohl bei $w/z = 0,42$ und $w/z = 0,25$ die vergleichsweise größten wirksamen Porenanteile auf.

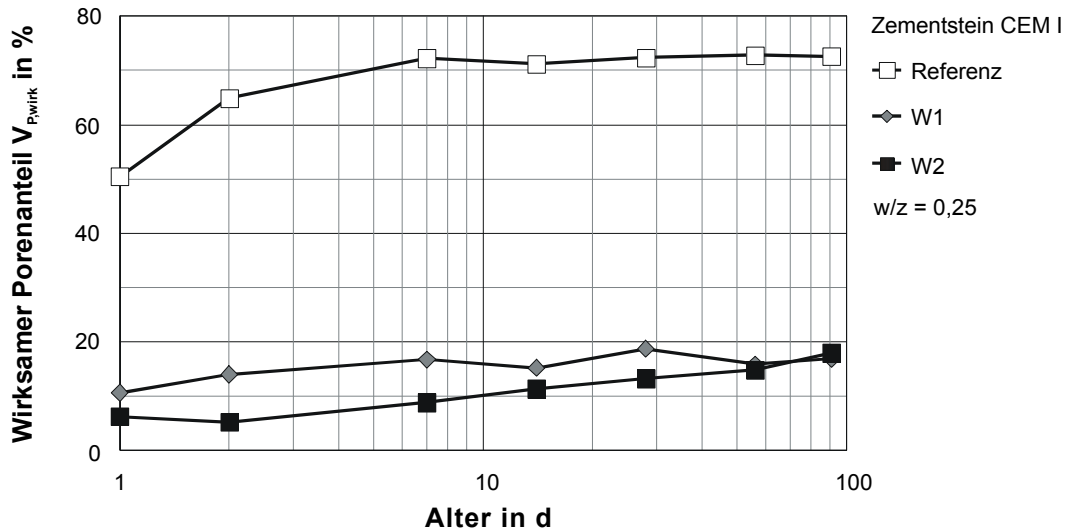


Bild 5-36 Durch Selbsttrocknung wirksamer Porenanteil in Zementstein CEM I mit $w/z = 0,25$; Dosierung der Wirkstoffe W1 und W2: 4,5 M.-% v. w

Die Untersuchungen an Zementsteinen CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III mit Schwindreduzierer SRA3 bestätigten im Wesentlichen die an Zementstein CEM I ermittelten Ergebnisse (siehe Bild B-31 bis Bild B-34, Anhang B). Die Ergebnisse zeigten auch, dass die Zementsteine ohne SRA mit den geringsten Ausgleichsfeuchten die größten wirksamen Porenanteile aufwiesen (vgl. Bild B-27 und Bild B-30, Anhang B, CEM Ia bzw. CEM III mit $w/z = 0,42$ und Bild 5-36, CEM I mit $w/z = 0,25$).

5.3.6.4 Wirksame Kapillarspannungen

In Abschnitt 5.3.6.1 wurde bereits erwähnt, dass nach Gleichung 6 die Kapillarspannungen im Zementstein abgeschätzt werden können. Mit dieser Gleichung kann in grober Näherung die Spannung in einer Kapillare berechnet werden, die in Abhängigkeit des Porenradius und der Oberflächenspannung durch die Porenlösung hervorgerufen wird. Um diese Spannung auf eine Zementsteinprobe zu übertragen, muss berücksichtigt werden, dass jeder Zementstein einen bestimmten wirksamen Porenanteil aufweist. Um diesen Anteil zu berücksichtigen, wurde zur Berechnung der wirksamen Kapillarspannungen Gleichung 6 um den Faktor des wirksamen Porenanteils erweitert. Es ergibt sich somit folgende Gleichung:

$$P_{wirk}(t) = \frac{2 \cdot \gamma(t)}{r(t) \cdot 10^6} \cdot V_{P,wirk}(t) \quad \text{Gleichung 10}$$

mit:

- $P_{wirk}(t)$ wirksame Kapillarspannung zum Zeitpunkt (t) [MPa]
- $\gamma(t)$ Oberflächenspannung der Porenlösung zum Zeitpunkt (t) [N/m]
- $r(t)$ Sättigungsradius zum Zeitpunkt (t) [m]

$V_{P,wirk}(t)$ wirksamer Porenanteil zum Zeitpunkt (t) [-]
 (t) Zeitpunkte 1^{*)}, 2, 7, 14, 28, 56 und 91 Tage
 *) gilt nur für w/z = 0,25

Die Einzelergebnisse der Berechnungen für die Zementsteine CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III mit den Wasserzementwerten von w/z = 0,42 und w/z = 0,25 sind in Tabelle A-17, Spalte 13, Anhang A, dargestellt. In Gleichung 11 wurden die wirksamen Kapillarspannungen der Zementsteine mit SRA auf die wirksamen Kapillarspannungen der Referenzproben ohne SRA zu den jeweiligen Zeitpunkten (t) bezogen.

$$rel. P_{wirk}(t) = \left(1 - \frac{P_{wirk,SRA}(t)}{P_{wirk,REF}(t)} \right) \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 11}$$

mit:

$rel. P_{wirk}(t)$ Relative wirksame Kapillarspannung zum Zeitpunkt (t) [%]
 $P_{wirk,SRA}(t)$ Wirksame Kapillarspannung von Zementstein mit SRA zum Zeitpunkt (t) [MPa]
 $P_{wirk,REF}(t)$ Wirksame Kapillarspannung von Zementstein ohne SRA zum Zeitpunkt (t) [MPa]
 (t) Zeitpunkte 1^{*)}, 2, 7, 14, 28, 56 und 91 Tage
 *) gilt nur für w/z = 0,25

In Bild 5-37 bis Bild 5-39 sind die relative wirksame Kapillarspannung (siehe auch Tabelle A-17, Spalte 14, Anhang A) gegen die Schwindreduzierung (siehe Abschnitte 5.3.3.4 bis 5.3.3.7) aufgetragen.

In Bild 5-37 ist die jeweilige relative wirksame Kapillarspannung und die entsprechende Schwindreduzierung von Portlandzementstein CEM I mit w/z = 0,42 mit den Schwindreduzierern SRA1 und SRA3 sowie den Wirkstoffen W1 und W2 dargestellt. Aus dem Bild geht hervor, dass die relativen wirksamen Kapillarspannungen in Abhängigkeit vom Wirkstoff zwischen rd. 70 % und rd. 100 % betrugen. Hierbei waren die relativen Kapillarspannungen mit Wirkstoff W1 am geringsten. Die Schwindreduzierungen betrugen in Abhängigkeit vom Wirkstoff, rd. 20 % und rd. 70 %. D. h. die jeweilige gemessene Schwindreduzierung war kleiner als durch Berechnung der relativen Kapillarspannungen bei proportionaler Abhängigkeit zu erwarten gewesen wäre.

Eine ähnliche Aussage geht aus Bild 5-38 hervor, in dem Kapillarspannungen und Schwindreduzierungen von Schwindreduzierer SRA3 in den Zementsteinen CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III mit w/z = 0,42 dargestellt sind. Hohen relativen wirksamen Kapillarspannungen (zwischen rd. 90 % und 100 %) standen hier teil-

weise Schwindreduzierungen von rd. 0 % gegenüber. Dies war anhand der Berechnungen der relativen Kapillarspannungen nicht zu erwarten.

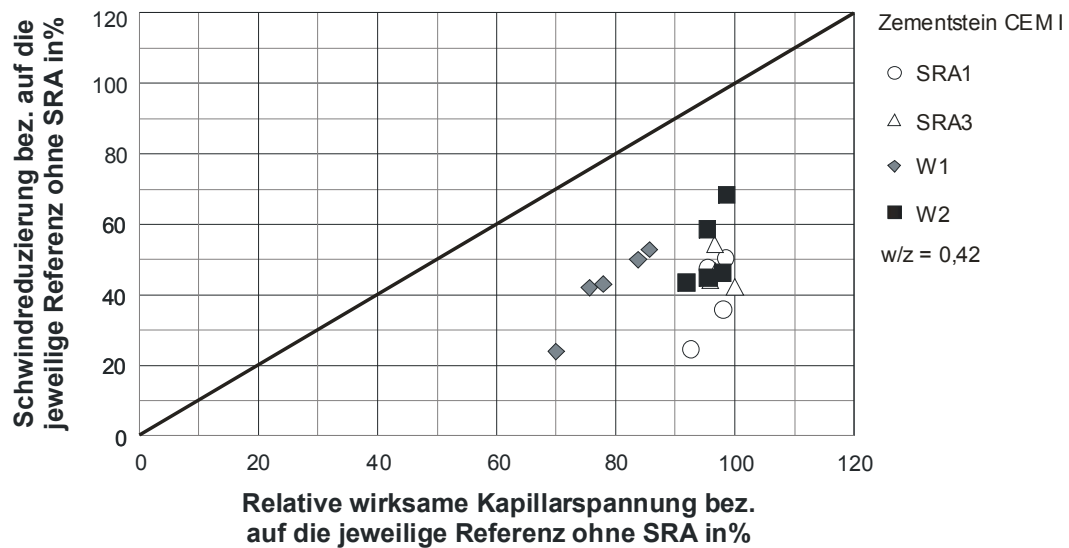


Bild 5-37 Relative wirksame Kapillarspannung in Korrelation zur jeweiligen Schwindreduzierung in Portlandzementstein CEM I mit w/z = 0,42; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

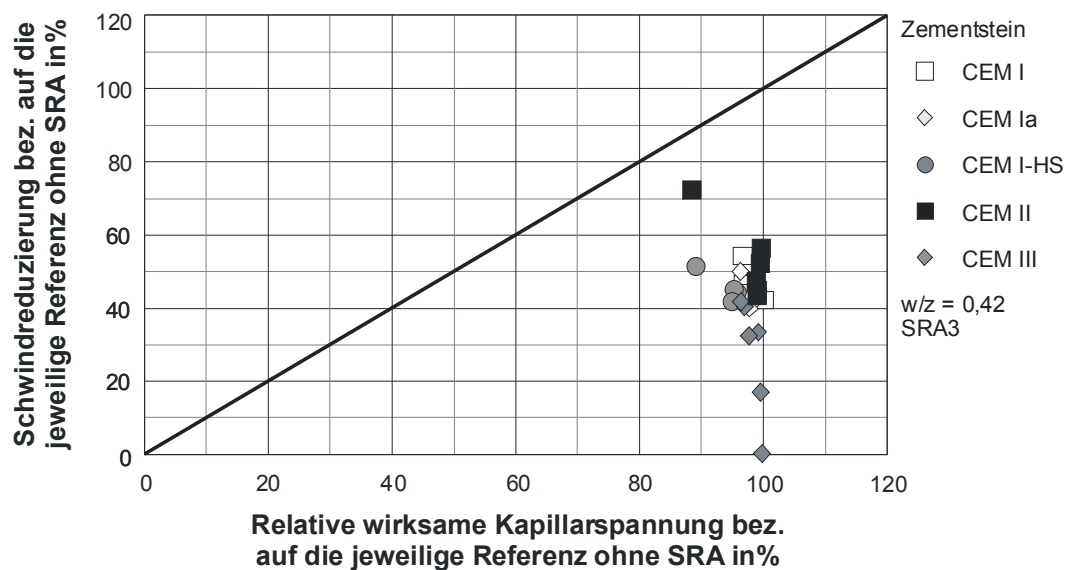


Bild 5-38 Relative wirksame Kapillarspannung in Korrelation zur jeweiligen Schwindreduzierung in den Zementsteinen CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III mit w/z = 0,42; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

Eine Absenkung des Wasserzementwerts auf w/z = 0,25 führte bei Portlandzementstein CEM I mit den Wirkstoffen W1 und W2 (Bild 5-39) zu vergleichbaren Ergebnissen wie mit w/z = 0,42 des gleichen Zementsteins (s. Bild 5-37). Die relativen wirksamen Kapil-

larspannungen (Abszisse) der Zementsteine mit W1 bzw. W2 betrugen unabhängig vom Alter zwischen rd. 90 % und rd. 100 %, während die Schwindreduzierungen zwischen rd. 40 % bis rd. 60 % bzw. zwischen rd. 50 % bis rd. 85 % betrugen.

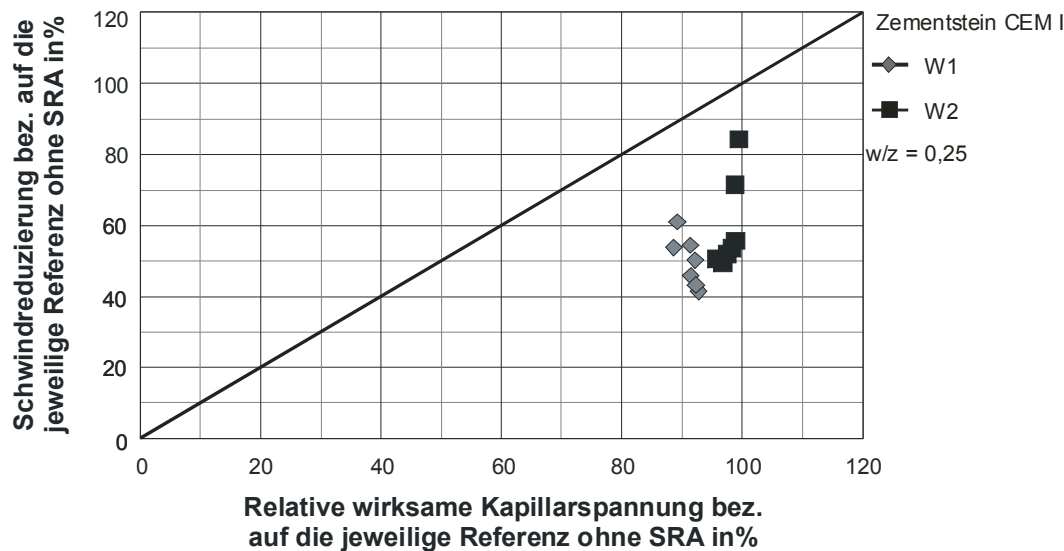


Bild 5-39 Relative wirksame Kapillarspannung in Korrelation zur jeweiligen Schwindreduzierung in Portlandzementstein CEM I mit $w/z = 0,25$; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

5.3.6.5 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Schwindreduzierer SRA1 und SRA3 sowie durch die Wirkstoffe W1 und W2 Zementsteine mit $w/z = 0,42$ und $w/z = 0,25$ größere Sättigungsradien aufwiesen als die jeweiligen Zementsteine ohne SRA. Dies war im Wesentlichen auf eine höhere innere relative Luftfeuchte zurückzuführen. Aber auch das erhöhte molare Volumen der Porenlösung, hervorgerufen durch die darin enthaltenen SRA, trug zu einem größeren Sättigungsradius bei.

Durch größere Sättigungsradien und ein feineres Porensystem war der Anteil an Poren, der durch innere Austrocknung Kapillarspannungen hervorrufen kann (wirksamer Porenanteil) in Zementstein mit SRA geringer als in den jeweiligen Proben ohne SRA. Somit blieb ein größerer Anteil an Poren im Zementstein mit SRA wasserdampfgesättigt.

Spannungen, die im Kapillarporensystem von Zementstein durch die Oberflächenspannung der Porenlösung hervorgerufen werden können, wurden durch Schwindreduzierer reduziert. Unabhängig von der Zementart, dem Wasserzementwert und der verwendeten SRA betrug die Reduzierung der wirksamen Kapillarspannung in Zementstein mit Berücksichtigung des (spannungs)wirksamen Porenanteils zwischen rd. 70 % bis 100 % bezogen auf den jeweiligen Zementstein ohne Schwindreduzierer.

Dagegen waren die ermittelten Schwindreduzierungen deutlich kleiner.

Das heißt, dass sich die Wirkung der SRA nur teilweise auf eine Verminderung des hydrostatischen Drucks der Porenlösung zurückführen lässt. Vielmehr ist zu prüfen, inwiefern SRA Einfluss auf die Spaltdruckwirkung der Porenlösung und die Grenzflächenenergie der Zementgelpartikel haben. Hierfür bieten das Münchner Modell [Wit 77] (s. Abschnitt 2.2.4) und die Spaltdrucktheorie (s. Abschnitt 2.2.4.2) einen Ansatz.

5.4 Einfluss von SRA auf das Trocknungsschwinden von Zementstein

5.4.1 Schwinden bei unterschiedlicher relativer Luftfeuchte

5.4.1.1 Allgemeines

Die in Abschnitt 5.3.6 dargestellten übergreifenden Zusammenhänge zeigten, dass die Wirkungsmechanismen der SRA nicht uneingeschränkt auf die reduzierte Oberflächenspannung der Porenlösung zurückgeführt werden können. Mit dem von Powers angewendeten Ansatz, im Bereich hoher relativer Feuchten die hygrischen Verformungen auf die Wirkung von Kapillarkräften und Meniskusbildung zurückzuführen, können die Wirkungsmechanismen von SRA somit ebenfalls nicht hinreichend beschrieben werden.

Einen weiteren Beschreibungsansatz liefert das Münchner Modell [Wit 77]. Nach diesem Modell sind die Schwindverformungen von Zementstein ebenfalls von der relativen Luftfeuchte abhängig, werden jedoch durch den Spaltdruck und die Änderung der Grenzflächenenergie des Zementsteins bestimmt (s. Bild 2-7, Abschnitt 2.2.4).

Um den Einfluss der Schwindreduzierer auf den Spaltdruck und die Grenzflächenenergie zu untersuchen, wurden Zementsteinprismen bei unterschiedlicher relativer Umgebungsfeuchte gelagert und die Schwindverformungen nach dem in Abschnitt 4.3.4.4 beschriebenen Verfahren bestimmt. Die Untersuchungen wurden an Portlandzementstein CEM I mit den Wasserzementwerten von $w/z = 0,42$ und $w/z = 0,25$ durchgeführt. Als Schwindreduzierer wurden im Zementstein mit $w/z = 0,25$ die Wirkstoffe W1 und W2 und im Zementstein mit $w/z = 0,42$ zusätzlich der Schwindreduzierer SRA3 verwendet.

5.4.1.2 Portlandzementstein CEM I mit SRA

In Bild 5-40 bzw. Bild 5-41 sind jeweils in der oberen Grafik die Endschwindmaße von Zementsteinprismen mit $w/z = 0,42$ bzw. $w/z = 0,25$ bei Erreichen der Ausgleichsfeuchte in Abhängigkeit der jeweiligen relativen Luftfeuchtigkeit dargestellt. In der jeweils unteren Grafik sind die aus den Schwindmaßen ermittelten Schwindreduzierungen bezogen auf die Referenzprobe ohne SRA dargestellt.

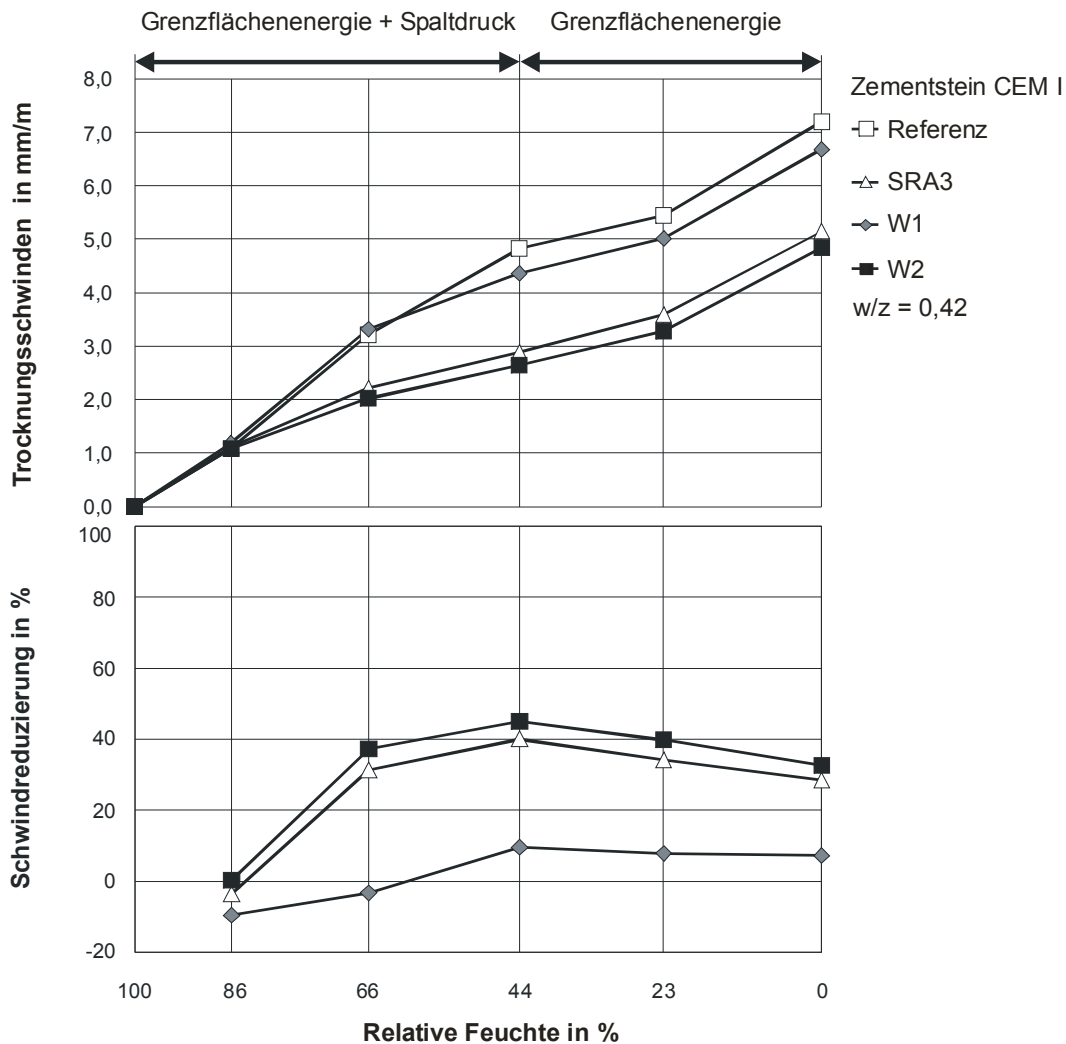


Bild 5-40 Trocknungsschwinden (oben) und Schwindreduzierung von Portlandzementstein CEM I jeweils bei Erreichen der Ausgleichsfeuchte bezogen auf die Referenzprobe (unten) in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte mit $w/z = 0,42$; Dosierung: 4,5 M.-% v. w.

In Bild 5-40 oben ist das Schwindmaß von Portlandzementstein CEM I mit $w/z = 0,42$ mit abnehmender relativer Luftfeuchte dargestellt. Die Verformungen zwischen 100 % und 44 % r. F. sind hierbei im Wesentlichen auf die Abnahme der Spaltdruckwirkung der Porenlösung zurückzuführen. Verformungen unterhalb von 44 % r. F. werden durch die Änderungen der Grenzflächenenergie hervorgerufen (vgl. Bild 2-7; [Wit 77]).

Das Endschwindmaß der Referenzprobe betrug bei rd. 0 % r. F. etwa 7,2 mm/m. Die Endschwindmaße des Zementsteins mit Wirkstoff W1 unterschieden sich unabhängig von der relativen Luftfeuchte nur unwesentlich von der Referenzprobe ohne SRA. Im Gegensatz dazu war das Trocknungsschwinden durch den Schwindreduzierer SRA3 und den Wirkstoff W2 unterhalb einer relativen Luftfeuchte von rd. 86 % in etwa vergleichbar, jedoch im Vergleich zur Referenz und zu W1 deutlich geringer. Unterhalb einer relativen Luftfeuchte von rd. 44 % unterschieden sich die Anstiege der Schwindmaße der

Proben mit SRA3, W1 und W2 im Vergleich zur Referenzprobe nicht mehr, d.h. in diesem Feuchtebereich wurde durch die Schwindreduzierer und Wirkstoffe keine zusätzliche schwindreduzierende Wirkung hervorgerufen.

In Bild 5-40 unten ist zu erkennen, dass die Schwindreduzierungen durch SRA3 bzw. W2 mit abnehmender relativer Feuchte bis rd. 44 % r. F. auf rd. 40 % bzw. 45 % zunahmen. Dies kann möglicherweise auf den Anstieg der SRA-Konzentration in der Porenlösung auf Grund der Verdunstung von freiem Wasser aus dem Zementstein zurückgeführt werden. Bei Feuchten unterhalb von 44 % wurde bei Zementstein mit W1 keine weitere Zunahme der schwindreduzierenden Wirkung und bei Zementstein mit W2 bzw. SRA3 ein Rückgang auf 33 % bzw. 29 % festgestellt. Dieser Rückgang der Schwindreduzierung bis zu einer Feuchte von rd. 0 % ist darauf zurückzuführen, dass bei zunehmenden absoluten Schwindmaßen der Referenzprobe (ϵ_R) unterhalb von 44 % r. F. die Differenz aus Schwindmaß der Referenz und Schwindmaß der Proben mit SRA3 bzw. W2 ($\epsilon_R - \epsilon_{SRA}$) in etwa gleich blieb. Somit verringerte sich die berechnete Schwindreduzierung „SR“ (s. Gleichung 5, Abschnitt 5.3.3.3).

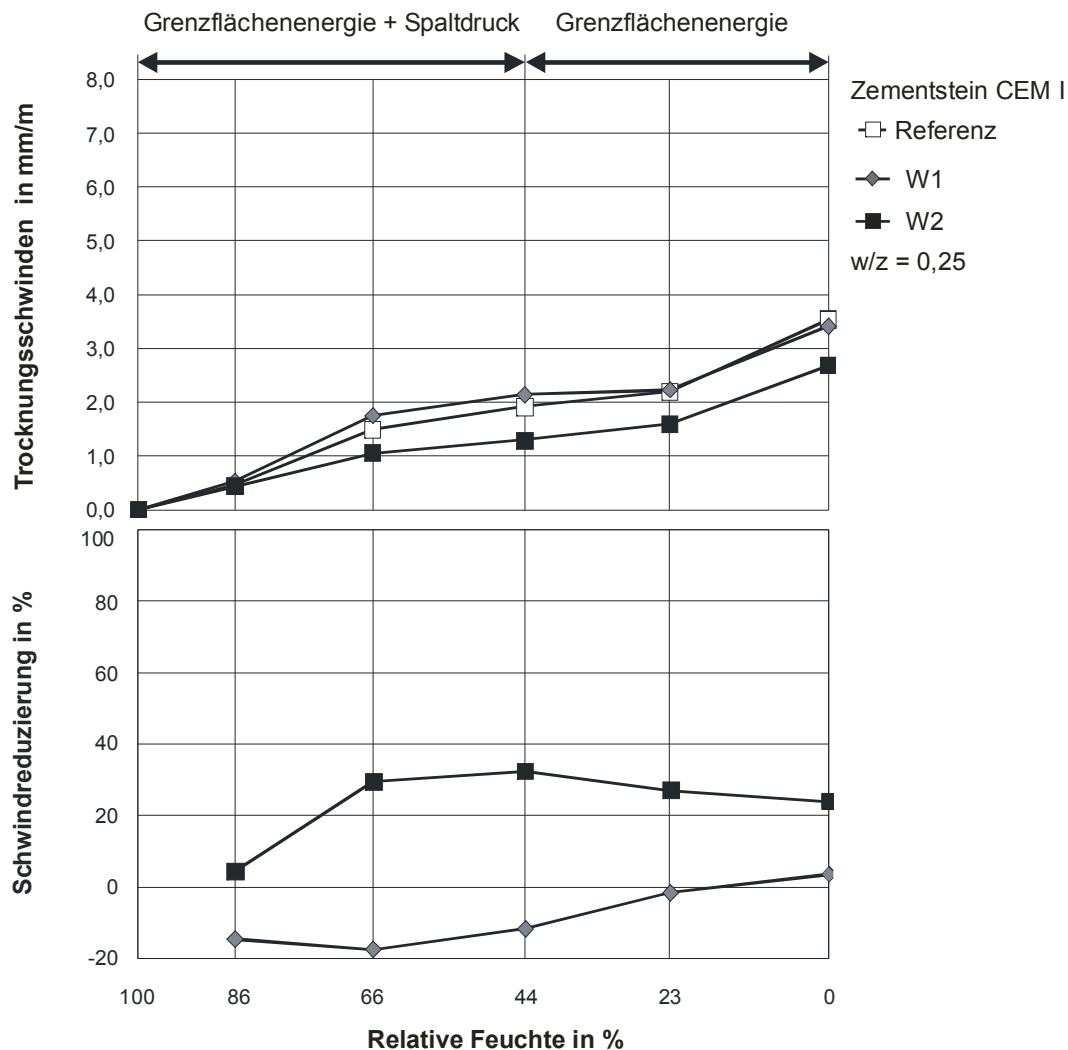


Bild 5-41 Trocknungsschwinden (oben) und Schwindreduzierung von Portlandzementstein CEM I jeweils bei Erreichen der Ausgleichsfeuchte bezogen auf die Referenzprobe (unten) in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte mit $w/z = 0,25$; Dosierung: 4,5 M.-% v. w.

Aus Bild 5-41 (oben) geht hervor, dass das Endschwindmaß des Referenzzementsteins ohne Schwindreduzierer mit $w/z = 0,25$ bei einer relativen Luftfeuchte von rd. 0 % rd. 3,5 mm/m betrug und somit etwa halb so groß war wie das Schwindmaß des Zementsteins mit $w/z = 0,42$. Die Schwindmaße der Probe mit Wirkstoff W1 unterschieden sich nur geringfügig von denen der Referenz. Dieses Verhalten war vergleichbar mit dem des Zementsteins mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,42$. Das Trocknungsschwinden mit Wirkstoff W2 wurde mit abnehmender Luftfeuchte bis 44 % zunehmend reduziert. Die maximale Schwindreduzierung bei dieser Feuchte betrug rd. 32 % (siehe Bild 5-41 unten). Unterhalb von 44 % veränderte sich das Schwindmaß im Vergleich zur Referenzprobe, vergleichbar mit $w/z = 0,42$, nicht mehr signifikant. Die leicht abnehmende Schwindreduzierung bis 0 % r. F. ist darauf zurückzuführen, dass die absoluten

Schwindmaße und damit auch die Bezugsgröße für die Schwindreduzierung größer wurde (s. Gleichung 5 und vgl. $w/z = 0,42$).

5.4.1.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Bei den Untersuchungen des Trocknungsschwindens bei unterschiedlicher relativer Luftfeuchte wurde bis zu einer relativen Luftfeuchte von 86 % r. F. jeweils fast keine schwindreduzierende Wirkung der SRA festgestellt. Das Trocknungsschwinden von Zementstein CEM I mit den Wasserzementwerten von $w/z = 0,42$ und $w/z = 0,25$ wurde durch den Wirkstoff W1 nicht wesentlich reduziert und war sogar teilweise größer als das der jeweiligen Referenzprobe. Der Schwindreduzierer SRA3 bzw. der Wirkstoff W2 reduzierten das Schwinden um maximal 40 % bzw. 45 % bei einem Wasserzementwert von $w/z = 0,42$. Die maximale Schwindreduzierung trat sowohl bei $w/z = 0,42$ als auch $w/z = 0,25$ bei einer relativen Luftfeuchte von rd. 44 % r. F. auf. Unterhalb von 44 % veränderte sich die schwindreduzierende Wirkung nicht mehr wesentlich.

Die schwindreduzierende Wirkung von SRA3 und W2 trat bei den Versuchen im Wesentlichen bei einer relativen Luftfeuchten zwischen 86 % und 44 % r. F. ein. Unterhalb von rd. 44 % r. F. änderte sich die Schwindreduzierung nicht mehr wesentlich. Diese Ergebnisse entsprechen weitestgehend den Ergebnissen von [Sat 83] (s. Abschnitt 2.4.4.2). Es kann daraus geschlossen werden, dass Schwindreduzierer SRA3 und Wirkstoff W2 im Wesentlichen die Spaltdruckwirkung der Porenlösung verstärkten und damit das Trocknungsschwinden reduzierten. Sie hatten keinen Einfluss auf das über Veränderung der Grenzflächenenergie des Zementsteins hervorgerufene Trocknungsschwinden.

5.4.2 Trocknungsschwinden von Zementmörtel zur Überprüfung der Zusammenhänge am Zementstein

5.4.2.1 Allgemeines

Die vorangegangenen Abschnitte zeigen, dass die Wirkung der SRA, die zu einer Schwindreduzierung führten, im Wesentlichen auf deren Einfluss auf die Spaltdruckwirkung der Porenlösung zurückzuführen ist. Um zu untersuchen, wie groß der Beitrag der Oberflächenspannung des Kapillarporenwassers auf das Trocknungsschwinden ist, wurden Zementmörtelprismen in Anlehnung an DIN EN 196-1 (Normmörtel) aus einer Charge hergestellt und gemäß Abschnitt 4.2.2 gelagert. In Vorversuchen wurde festgestellt, dass Zementsteinprismen bei der Trocknung zu starker Rissbildung neigten, die die Messergebnisse verfälschten. Aus diesem Grund wurden Mörtelprismen verwendet. Ziel war es, Mörtelprismen mit nahezu gleicher Gesamtporosität und nahezu gleicher Porenradienverteilung herzustellen, um den Einfluss der SRA auf die Porenradienverteilung und auf das Trocknungsschwinden auszuschließen (vgl. Abschnitt 5.3.4).

Die Nachbehandlung in Wasser diente dazu, einen hohen Hydratationsgrad des Zements zu gewährleisten. Durch die anschließende schonende Trocknung bei $(40 \pm 2) ^\circ\text{C}$ wurde das Wasser aus den Kapillarporen der Mörtelprismen nahezu vollständig ausgetrieben.

Durch die anschließende Vorlagerung wurde das Kapillarporensystem der Mörtelprismen mit Wasser bzw. wässrigen SRA-Lösungen gesättigt. Die nachfolgende Trocknung im Klima 20/65 sollte zeigen, welchen Einfluss die Oberflächenspannung der Kapillarporenlösung (Wasser bzw. SRA-Lösung) auf das Trocknungsschwinden von Zementmörtel hat.

5.4.2.2 Zementmörtel mit Portlandzement CEM I

Für die Herstellung der SRA-Lösungen wurden die Schwindreduzierer SRA1, SRA2 und SRA3 sowie die Wirkstoffe W1 und W2 verwendet. Die SRA wurden in einer Dosiermenge von 4,5 M.-% v. w in deionisiertem Wasser gelöst. Die Referenzprobe wurde mit deionisiertem Wasser gesättigt. Die Längenänderungen während der Lagerung in den Lösungen und während der Lagerung im Klima 20/65 wurden nach den in Abschnitt 4.3.4.3 angegebenen Zyklen bestimmt. Die Gesamtporosität der Prismen war nach Abschluss der Nachbehandlung (Wasserlagerung und Trocknung) gleich und betrug rd. 13,4 Vol.-%. Die Kapillarporosität bzw. Gelporosität (gemäß Definition in Abschnitt 5.3.4) betrug rd. 11,9 Vol.-% bzw. rd. 1,5 Vol.-%.

Nach Abschluss der Sättigung wiesen alle Prismen unabhängig von der verwendeten SRA-Lösung das gleiche Dehnmaß von rd. 0,75 mm/m auf. Für die nachfolgenden Schwindmessungen während der Austrocknung wurde diese Länge als Bezugslänge angenommen und zu Null gesetzt.

In Bild 5-42 ist das Trocknungsschwinden (oben) und die Schwindreduzierung bezogen auf die Referenzprobe (unten) dargestellt.

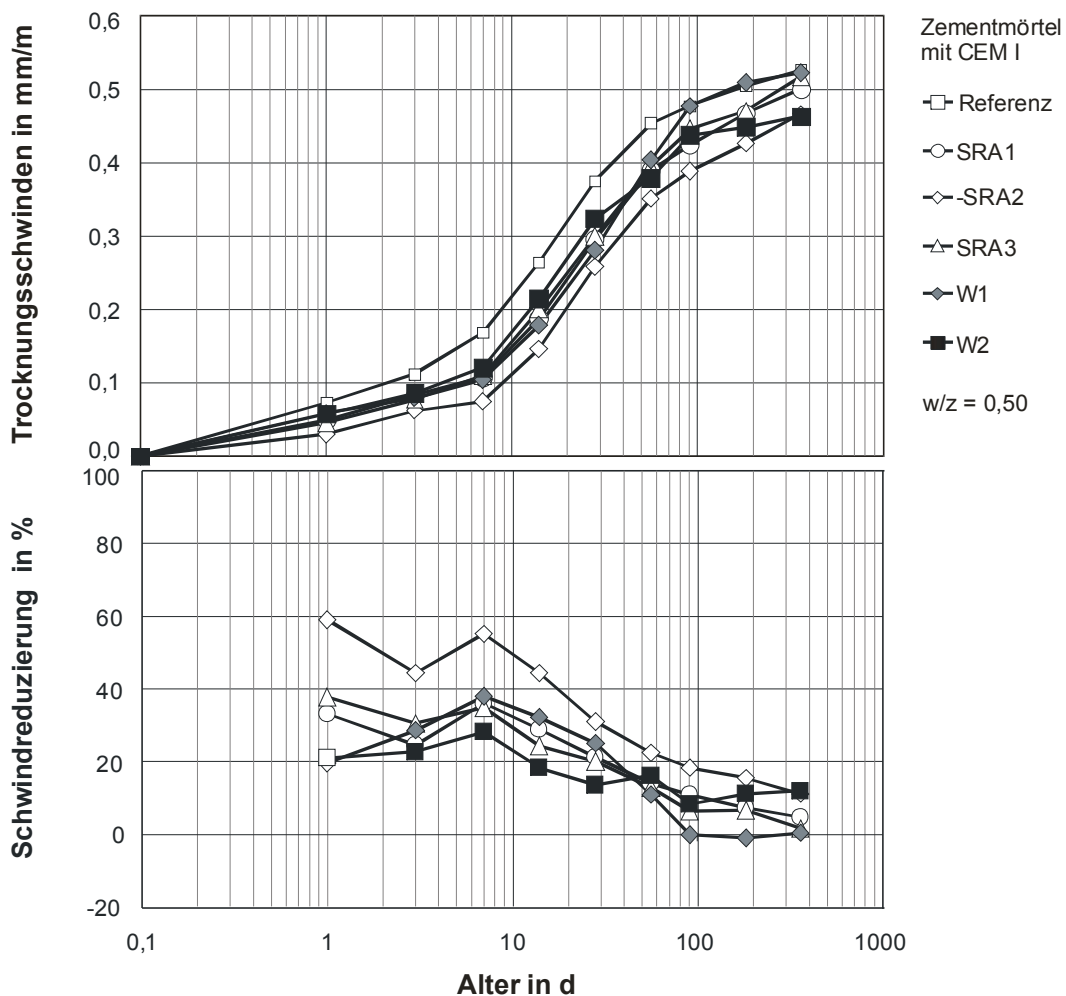


Bild 5-42 Trocknungsschwinden von Zementmörtel mit Portlandzement CEM I und mit $w/z = 0,50$ nach kapillarer Aufnahme von Wasser bzw. SRA-Lösungen mit einer Dosierung von 4,5 M.-% v. w

Aus Bild 5-42 (oben) geht hervor, dass bis zu einem Alter von 91 Tagen die Referenzprobe das größte Schwindmaß aufwies. Danach war das Trocknungsschwinden der Probe mit Wirkstoff W1 nahezu genauso groß. Das Trocknungsschwinden der Proben, die mit den Lösungen SRA1, SRA2, SRA3 und W2 gesättigt wurden, war geringer und im Alter von 364 Tagen fast abgeschlossen.

Bild 5-42 (unten) zeigt, dass die Schwindreduzierung der mit SRA gesättigten Proben mit zunehmendem Alter von rd. 20 % bis rd. 60 % auf rd. 0 % bis rd. 10 % abnahm. Die größte Reduzierung über den Zeitraum von 364 Tagen wurde mit Schwindreduzierer SRA2 ermittelt, die geringste mit Wirkstoff W1. Zwischen 91 Tagen und 364 Tagen veränderte sich die Schwindreduzierung jeweils nur noch geringfügig.

5.4.2.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zementmörtelprismen mit nahezu gleicher Porosität und Porenradienverteilung wurden nach dem Trocknen bei $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ bis zur Massekonstanz mit deionisiertem Wasser und SRA-Lösungen durch kapillares Saugen gesättigt. Nach Erreichen der Massekonstanz wurde das Trocknungsschwinden während der Verdunstung im Klima 20/65 bestimmt. Das Trocknungsschwinden von Proben, die Lösungen aufgenommen hatten, deren Oberflächenspannung durch SRA herabgesetzt wurde, war im Vergleich zu Referenzproben, die mit Wasser gesättigt wurden, geringer.

Bild 5-43 erklärt, warum die Schwindreduzierung im jungen Alter größer war als nach 364 Tagen. Im jungen Alter waren die Kapillarporen noch stark mit Wasser bzw. SRA-Lösung gesättigt und es konnte viel Flüssigkeit an die Umgebung abgegeben werden (verdunsten). In diesem Zustand hatte die reduzierte Oberflächenspannung der SRA-Lösungen den größten Einfluss auf das Trocknungsschwinden. Mit zunehmendem Alter nahm die Verdunstungsrate ab und in den Proben stellte sich zunehmend eine Ausgleichsfeuchte von rd. 65 % r. F. ein. Gleichzeitig ließ auch die Schwindreduzierung nach. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Schwinden im Bereich von rd. 65 % r. F. im Wesentlichen durch die Abnahme des Spaltdrucks und die Zunahme der Grenzflächenenergie des Zementsteins bestimmt wird [Wit 77]. Der Beitrag der reduzierten Oberflächenspannung an der Schwindreduzierung verringerte sich somit von maximal rd. 60 % im nahezu gesättigten Zustand auf maximal 12 % im Zustand der Ausgleichsfeuchte von 65 % r. F. (jeweils mit SRA2). Am Beispiel des Wirkstoffs W1 wurde festgestellt, dass durch die reduzierte Oberflächenspannung des Kapillarporenwassers das Trocknungsschwinden im Zustand der Ausgleichsfeuchte bei 65 % r. F. nicht herabgesetzt wurde (s. Bild 5-42).

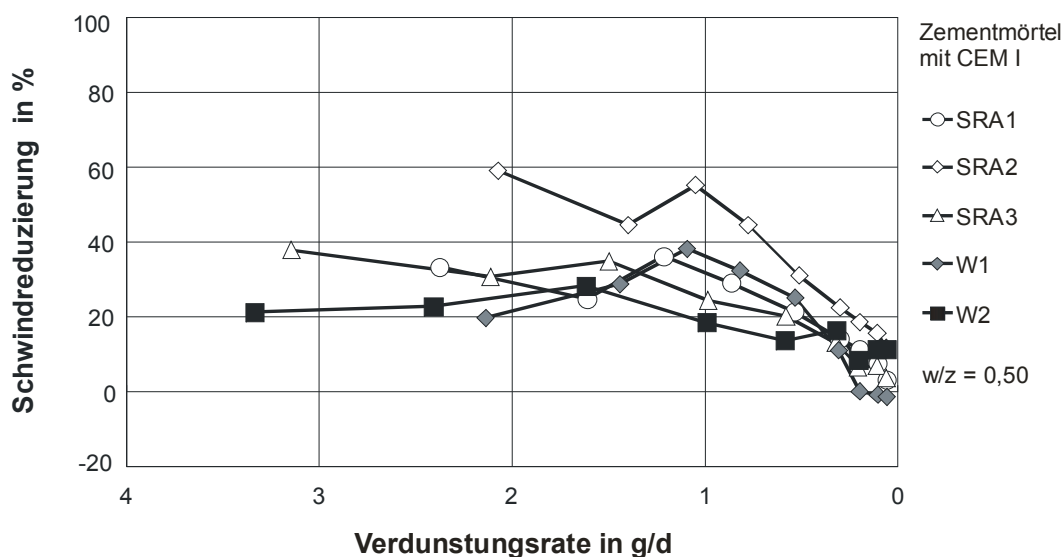


Bild 5-43 Schwindreduzierung in Abhängigkeit von der Verdunstungsrate

5.4.3 Hydratation von Zement

5.4.3.1 Allgemeines

Die Ergebnisse zur Bestimmung der Zeitpunkte „Time-Zero“ (Abschnitt 4.3.4.2) zeigten, dass dieser in den meisten Fällen in Zementleim/stein mit SRA im Vergleich zur jeweiligen Referenzprobe etwas verzögert auftrat. Weiterhin zeigten die Ergebnisse der Quecksilberintrusionsmessungen (Abschnitt 5.3.4), dass durch SRA das Porengefüge von Zementstein verfeinert wurde. Diese Phänomene können möglicherweise auf einen Einfluss der SRA auf die Hydratation des Zements zurückgeführt werden. In den folgenden Abschnitten werden Ergebnisse von Versuchen dargestellt, in denen der Einfluss der SRA auf die Hydratationswärmeentwicklung und die morphologische Ausbildung des Zementsteingefüges untersucht wurde.

5.4.3.2 Hydratationswärmeentwicklung

Die Hydratationswärmeentwicklung wurde nach dem in Abschnitt 4.3.4.7 beschriebenen Verfahren bestimmt.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Schwindreduzierer auf die Hydratationswärmeentwicklung wurde mit Portlandzement CEM I bei einem Wasserzementwert von $w/z = 0,42$ und $w/z = 0,25$ durchgeführt. In die Untersuchungen wurden die Schwindreduzierer SRA1, SRA2, SRA3 sowie die Wirkstoffe W1 und W2 einbezogen.

Die Hydratationswärmeraten und –wärmemengen der Untersuchungen bei $w/z = 0,42$ sind in Bild B-35 bis Bild B-38, Anhang B, dargestellt. Aus Bild B-35 geht hervor, dass die Hydratationswärmeentwicklung des Portlandzements durch den Schwindreduzierer SRA3 in der Präinduktionsperiode nicht beeinflusst wurde. Die übrigen SRA führten zu einer Verringerung der Hydratationswärmerate. Am stärksten wurde die Präinduktionsperiode durch den Wirkstoff W2 beeinflusst. Hierbei wurde die Hydratationswärmerate etwa halbiert.

Die Hydratation der Hauptklinkerphasen (2. Maxima) in der Accelerationsperiode wurde durch die Schwindreduzierer und Wirkstoffe um rd. 2 Stunden (SRA3) bis 3,5 Stunden (W1) verzögert und die Hydratationswärmerate und –menge etwas verringert.

Der Einfluss steigender Zugabemengen schwindreduzierender Zusatzmittel auf die Hydratationswärmeentwicklung wurde am Beispiel des Schwindreduzierer SRA3 und der Wirkstoffe W1 und W2 untersucht und ist in Bild B-36 bis Bild B-38, Anhang B, dargestellt. Es wurden dabei Dosierungen von 2,25; 4,5; 9 und 18 M.-% v. w verwendet.

Die Erhöhung des Wirkstoffgehalts von SRA3 führte erwartungsgemäß zu einer geringen Verzögerung bzw. Reduktion der Hydratationswärmeraten in der Präinduktionsperiode. Die Hydratation der Hauptklinkerphasen wurde jedoch deutlich verzögert. Hierbei muss angemerkt werden, dass die Dosierung von 9 M.-% v. w bzw. 18 M.-% v. w

nicht mehr praxisrelevant sind, da erhebliche Mengen des Zugabewassers durch Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff ersetzt wurden.

Wirkstoff W1 (s. Bild B-37, Anhang B) beeinflusste die Präinduktionsperiode und die Hydratation der Hauptklinkerphasen in ähnlicher Weise wie der Schwindreduzierer SRA3, der den Wirkstoff W1 zu rd. 50 % enthielt.

In Bild B-35, Anhang B, ist zu erkennen, dass der Wirkstoff W2 bei einer Dosierung von 4,5 M.-% v. w zu einer Abnahme der Hydratationswärmeraten in der Präinduktionsperiode um rd. 50 % führte. Mit steigender Dosierung verzögerte sich die Hydratation der Hauptklinkerphasen bei einer Zugabe von 18 M.-% v. w. um rd. 5 Stunden. Im Vergleich zu SRA3 und W1 war die Verzögerung jedoch eher gering.

Es lässt sich somit feststellen, dass eine praxisübliche Dosierung (4,5 M.-% v. w) der Schwindreduzierer SRA1 bis SRA3 und der Wirkstoffe W1 und W2 zu einer geringen Verzögerung der Hauptklinkerphasen um maximal 3,5 Stunden führte. Der Einfluss des Schwindreduzierers SRA3 auf die Hydratation wurde hauptsächlich durch den darin enthaltenen Wirkstoff W1 hervorgerufen.

Bei Zementstein mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,25$ wurden die an Portlandzement CEM I mit $w/z = 0,42$ ermittelten Ergebnisse im Wesentlichen bestätigt. In Bild B-39, Anhang B, sind die Hydratationswärmeraten und –wärmemengen mit Schwindreduzierer SRA3 und den Wirkstoffen W1 und W2 dargestellt. Die Hydratationswärmeentwicklung des Portlandzements wurde in der Präinduktionsperiode durch die SRA deutlich reduziert und geringfügig verzögert.

Die Hydratation der Hauptklinkerphasen in der Accelerationsperiode (2. Maxima) wurde durch den Schwindreduzierer und die Wirkstoffe in vergleichbarer Art und Weise um rd. 3 Stunden (W2) bis 6 Stunden (W1) verzögert. Das spiegelte sich in etwas verringerten Wärmemengen nach 72 Stunden wider. Die im Vergleich zu $w/z = 0,42$ deutliche Verzögerung und Reduktion der Hydratationswärmeraten und –menge sind zum einen auf den geringen Wasserzementwert und somit auf die größere auf den Zement bezogenen SRA-Konzentration zurückzuführen. Zum anderen können möglicherweise aber auch Wechselwirkungen mit dem verwendeten Fließmittel zu einer zusätzlichen Verzögerung der Hydratation führen.

Die unterschiedliche Beeinflussung der Hydratation durch die Wirkstoffe W1 und W2 könnte auf deren unterschiedliches Verhalten in Wasser zurückzuführen sein. W1 lässt sich auf Grund seiner Molekülstruktur besser in Wasser lösen. Durch diese Affinität zu Wasser beeinflusste W1 die Hydratation stärker als W2.

5.4.3.3 Rasterelektronenmikroskopische Gefügeuntersuchungen

In Abschnitt 5.3.4.3 wurde dargestellt, dass sich das Porengefüge von Zementstein durch SRA verfeinerte. Um der Frage nachzugehen, worauf die feinere Porenradienverteilung zurückzuführen ist, wurden auch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an Zementstein mit Portlandzement CEM I mit einem Wasserzementwert von

$w/z = 0,42$ und den beiden Wirkstoffen W1 und W2 nach dem in Abschnitt 4.3.4.8 beschriebenen Verfahren durchgeführt.

In Bild B-40 bis Bild B-43, Anhang B, sind exemplarisch die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Referenzproben und der Zementsteine mit SRA abgebildet. Je Untersuchungszeitpunkt ist i. d. R. jeweils eine Aufnahme in 1.000facher bis 5.000facher sowie eine Aufnahme in 5.000facher bis 10.000facher Vergrößerung abgebildet. Die beschriebenen Hydratationsprodukte wurden mittels EDX-Analyse verifiziert.

Die Untersuchungen im Alter von sechs Stunden (s. Bild B-40, Anhang B) zeigten weder im Nieder- noch im Hochvakuum-Modus signifikante Unterschiede zwischen der Referenzprobe und den Proben mit SRA. Die Zementpartikel wiesen oberflächlich Reaktionsräume auf, die naturgemäß Ettringit enthielten.

Im Alter von 24 Stunden (s. Bild B-41, Anhang B) wiesen alle Zementsteine auf Grund des niedrigen Wasserzementwerts von $w/z = 0,42$ eine sehr dichte Struktur auf. Die Calcium-Silikat-Hydrate der Proben mit Wirkstoff W1 und W2 wiesen eine scheinbar schwammigere Struktur auf. Die C-S-H- und Ettringitnadeln erschienen etwas feiner. Mit Wirkstoff W1 lag das gebildete Portlandit in plattigen und gefächerten Strukturen vor, während es in der Referenzprobe und in der Probe mit W2 bankig und massiv erschien.

Vergleichbar mit den Proben im Alter von 24 Stunden waren die Strukturen im Alter von sieben und 28 Tagen ebenfalls sehr dicht. Mit Wirkstoff W1 lag der Portlandit wie schon nach 24 Stunden in gefächelter, plattiger Struktur vor. Sowohl mit Wirkstoff W1 als auch mit W2 wurden im Alter von sieben Tagen (s. Bild B- 42, Anhang B) Poren mit hexagonalen blättchenförmigen Portlandit bzw. Monosulfat gefunden.

5.4.3.4 Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zeigten, dass die Hydratation von Zement durch die untersuchten Schwindreduzierer und Wirkstoffe bei praxisüblichen Dosierungen (4,5 M.-% v. w) geringfügig beeinflusst wurde.

Die Ergebnisse der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen geben Hinweise darauf, dass bestimmte Hydratationsprodukte durch die Anwesenheit von SRA-Molekülen einen veränderten Habitus aufweisen können. Insbesondere die veränderte Morphologie des Portlandits in Zementstein mit CEM I mit Wirkstoff W1 scheint ein möglicher Grund dafür zu sein, dass der Zementstein im Vergleich zur Referenzprobe ohne SRA ein verfeinertes Porensystem aufwies. Diese These wird gestützt durch Untersuchungsergebnisse von [Mal 05], nach denen sich die Morphologie von Calciumhydroxidkristallen in Anwesenheit von Schwindreduzierer-Molekülen veränderte. Diese Hinweise sind durch weiterführende systematische Untersuchungen zu bestätigen.

6 Modell zu den Wirkungsmechanismen schwindreduzierender Zusatzmittel und Wirkstoffe in Zementstein

Aus der zusammenfassenden Betrachtung der Ergebnisse wird ein qualitatives Modell zur Beschreibung der Wirkungsmechanismen von schwindreduzierenden Zusatzmitteln und Wirkstoffen in Zementstein unter konservierenden Lagerungsbedingungen abgeleitet. Das Modell wird anhand der verwendeten Hauptwirkstoffe W1 (Dipropylenglykol) und W2 (Dipropylenglykol-tert.-butyl-ether) hergeleitet. Ausgehend von den wirkstoffspezifischen Wechselwirkungen mit Wasser werden hierbei die Wirkungen von Wirkstoff W2 auf

- die Oberflächenspannung der Porenlösung,
- die Porenradienverteilung des Zementsteins,
- die innere relative Luftfeuchte des Zementsteins,
- die wirksame Kapillarspannungen in der Porenlösung und
- den Spaltdruck

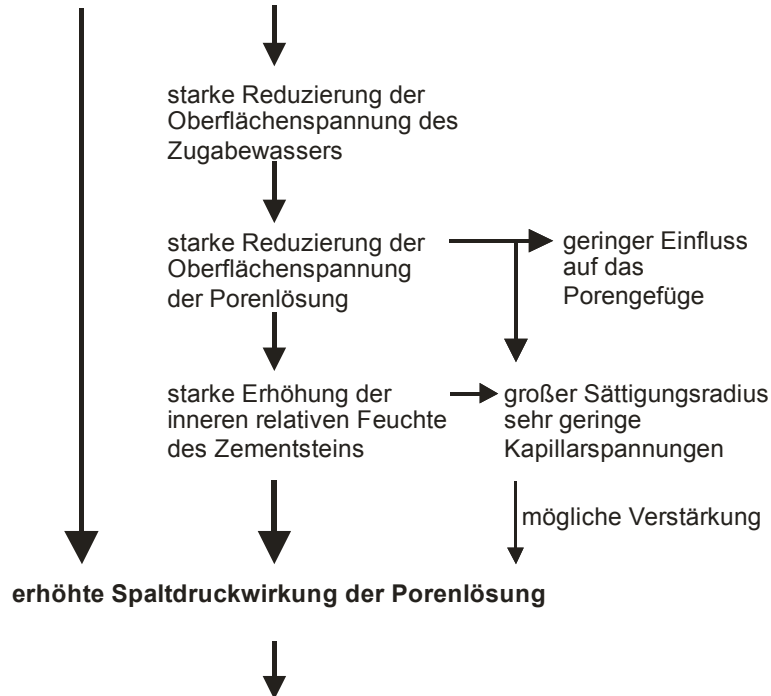
herangezogen. Anhand dieser Wirkungen wird erläutert, wie das autogene Schwinden von Zementstein reduziert wird. Vergleichend dazu wird anhand der Wirkung von Wirkstoff W1 auf die genannten Eigenschaften gezeigt, warum die schwindreduzierende Wirkung aufgehoben und das autogene Schwinden sogar verstärkt werden kann. Die Wirkungsweisen von W2 bzw. W1 sind schematisch in Bild 6-1 bzw. Bild 6-2 dargestellt. Eine Zusammenfassung des Einflusses der Wirkstoffe W1 und W2 auf die wesentlichen untersuchten Eigenschaften von Zugabewasser, Porenlösung, Zementleim, Zementstein und Mörtel ist in Abhängigkeit des Zements und des Wasserzementwertes in Tabelle A-18, Anhang A, dargestellt.

Wechselwirkungen der SRA-Moleküle mit der Porenlösung

Durch die hydrophoben Seitenketten der SRA-Moleküle wird die Oberflächenspannung der Porenlösung abgesenkt. Eine große Anzahl hydrophober Molekülgruppen (W2, s. Tabelle 5-1) und lange Seitenketten (SRA2, s. Tabelle 5-1) führen zu einer starken Absenkung der Oberflächenspannung der Porenlösung. Durch die Zunahme der Konzentration der SRA-Moleküle in der Porenlösung mit fortschreitender Hydratation wird die kritische Mizellbildungskonzentration erreicht und die Oberflächenspannung fällt auf ein Minimum. Sie ändert sich mit zunehmendem Alter nicht mehr.

Wirkstoff W2

schlechte Löslichkeit und starke hydrophobe Wechselwirkung mit Wasser und Porenlösung



Reduzierung des autogenen Schwindens

Bild 6-1 Wirkung von Wirkstoff W2 in Wasser und in Porenlösung und der Einfluss auf das Porengefüge, innere relative Feuchte und den Spaltdruck im Hinblick auf deren Auswirkungen auf das autogene Schwinden

Der Wirkstoff W2 ist auf Grund der größeren Anzahl hydrophober Endgruppen weniger polar als Wirkstoff W1. Dadurch reduzierte W2 die Oberflächenspannung der Porenlösung deutlich stärker als W1.

Mit fortschreitender Hydratation und den Einbau von Wasser in Hydratphasen, nimmt der Gehalt an freiem Wasser im erhärtenden Zementstein ab. Durch den ausgeprägten hydrophoben Molekülaufbau der SRA-Moleküle treten hydrophobe Wechselwirkungen mit Wasser bzw. Porenlösung auf. Die Wechselwirkungen mit den geladenen Oberflächen des Zementsteins sind dagegen gering. Dadurch steigt die Konzentration von SRA-Molekülen in der Porenlösung. Warum mit Wirkstoff W2 ein Rückgang der SRA-Konzentration in der Porenlösung auftrat, konnte nicht abschließend geklärt werden. Möglicherweise wurden Moleküle und Mizellen auf Grund zunehmender Gefügeverdichtung zwischen den Gelteilchen eingelagert.

Wirkstoff W1

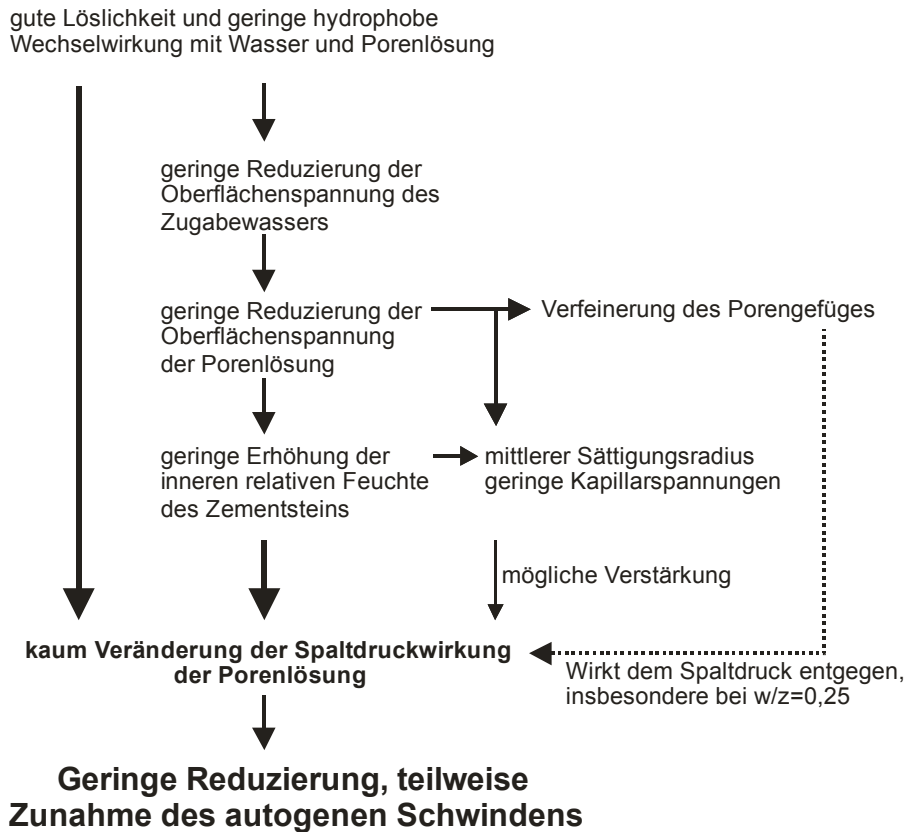


Bild 6-2 Wirkung von Wirkstoff W2 in Wasser und in Porenlösung und der Einfluss auf das Porengefüge, innere Feuchte und den Spaltdruck im Hinblick auf deren Auswirkungen auf das autogene Schwinden

Verfeinerung des Porensystems

SRA-Moleküle können das Porensystems von Zementstein verfeinern. Die Ursachen dafür konnten in dieser Arbeit nicht geklärt werden und es besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Insbesondere Wirkstoff W1 führte zu einer deutlichen Zunahme der Gelporosität. Möglicherweise führt die reduzierte Oberflächenspannung des Zugabewasser-SRA-Gemisches zu einer besseren Dispergierbarkeit des Zements beim Anmischen. Darüber hinaus kann sich die Polarität des Wassers und der Porenlösung durch SRA-Moleküle und damit möglicherweise das Lösungsverhalten der Klinkerphasen ändern. Die Hydratationsprodukte können dann einen veränderten Habitus aufweisen.

Innere relative Luftfeuchte von Zementstein

Die Konzentration der SRA-Moleküle steigt in der Porenlösung durch den Einbau von Wasser in Hydratphasen an. Durch die hydrophoben Wechselwirkungen der SRA-Moleküle mit der Porenlösung können die thermodynamischen Zustandsgrößen der Po-

renlösung und die Wasserstruktur verändert werden. Dadurch können mehr Wassermoleküle die gegenseitigen Anziehungskräfte (Dipol-Kräfte) überwinden und in den Gasraum verdunsten.

Weiterhin können sich, bedingt durch den Anstieg der SRA-Konzentration, durch hydrophobe Wechselwirkungen Mizellen mit Abmessungen von wenigen Nanometern bilden. Sie entstehen aus SRA-Molekülen in den dünnen Schichten aus adsorbierter Porenlösung. Dadurch vergrößert sich die Oberfläche der Porenlösung, und es können mehr Wassermoleküle von der Oberfläche der C-S-H-Phasen in den Porenraum des Zementsteins verdunsten. Dies kann zu einem Anstieg der inneren relativen Feuchte führen. Je größer hierbei der unpolare Anteil der Moleküle ist (Wirkstoff W2), desto mehr Mizellen können sich bilden und umso mehr Wasser verdunstet in den Porenraum. Diese freien Wassermoleküle können wiederum auf freien Oberflächen adsorbieren und zu einer dauerhaft erhöhten relativen Feuchte im Zementstein beitragen. Schematisch ist dies in Bild 6-3 dargestellt.

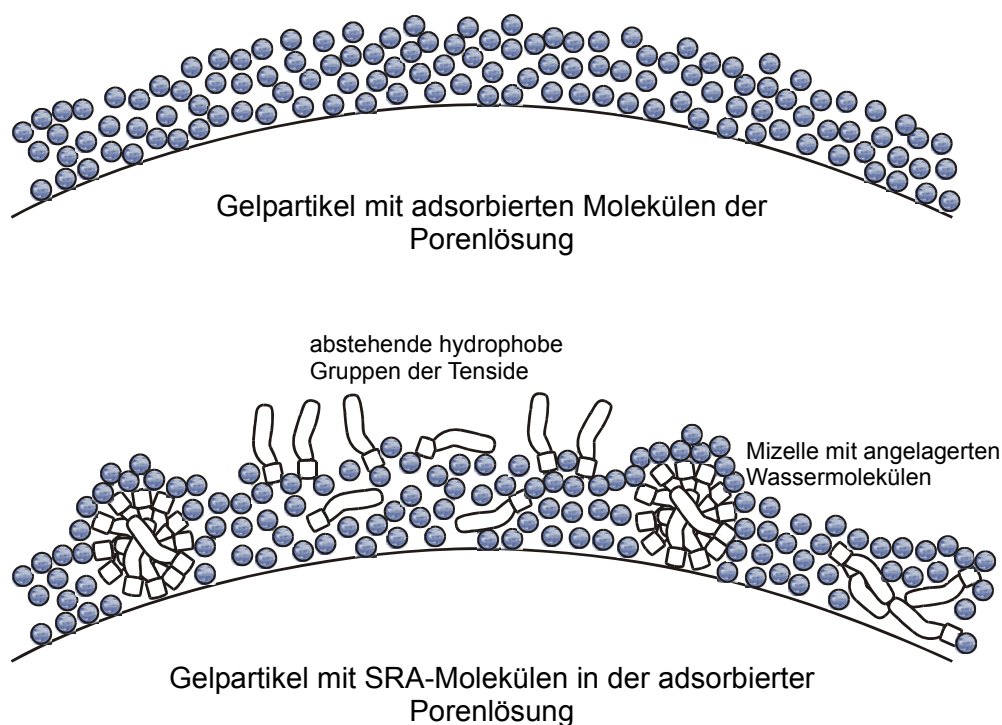


Bild 6-3 Schematische Darstellung der adsorbierten Porenlösung auf einem Zementsteinpartikel mit und ohne SRA-Moleküle

Wirksame Kapillarspannungen in der Porenlösung

Die geringe Oberflächenspannung der Porenlösung und die erhöhte relative Feuchte im Zementstein führten zu einer Reduzierung der Kapillarspannungen im Porenraum. Die

wirksamen Kapillarspannungen sind kleiner, je geringer die Oberflächenspannung der Porenlösung und je höher die relative Feuchte ist (Wirkstoff W2). Die ermittelten Schwindreduzierungen korrelierten jedoch schlecht mit der entsprechenden wirksamen Kapillarspannung in der Porenlösung. Die reduzierte Oberflächenspannung der Porenlösung kann folglich nicht als Hauptwirkungsmechanismus der SRA gesehen werden.

In den Abschnitten 2.2.4.1 und 2.2.4.2 wurde dargestellt, dass der Kapillardruck der Porenlösung nur in geringem Maße zu hygrischen Verformungen des Zementsteins beiträgt. Dies bestätigt die genannten Schlussfolgerungen.

Auswirkungen auf den Spaltdruck

Die Wechselwirkungen der Porenlösung mit der Zementsteinoberfläche beeinflussen den Spaltdruck. Der Spaltdruck wird hierbei durch die Zusammensetzung der Porenlösung beeinflusst. Die Wirkstoffe W2 und W1 weisen in wässriger Lösung deutliche Unterschiede auf. W1 weist bei gleicher Dosiermenge (4,5 M.-% v. w) unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Molarität gegenüber W2 rd. 2,8 mal so viele Hydroxyl-Gruppen auf, d.h. es sind mehr hydrophile „Ankopplungspunkte“ für das Wasser vorhanden (vgl. Tabelle 5-1). Gleichzeitig weisen die Moleküle des Wirkstoffs W2 eine größere Anzahl an Methyl-Gruppen auf, die zu einer verstärkten hydrophoben Wechselwirkung in Wasser bzw. Porenlösung beitragen. Bei gleicher Dosierung in wässriger Lösung ist der Anteil hydrophober Methyl-Gruppen von Wirkstoff W2 rd. 1,8-mal größer als der von W1. Dadurch ist die Löslichkeit von W2 in der Porenlösung geringer als von W1, und die Eigenschaften des Wassers bzw. der Porenlösung werden in stärkerem Maße verändert. Diese Wechselwirkungen können die Spaltdruckwirkung der Porenlösung mit SRA im Vergleich zu Porenlösung ohne SRA erhöhen. Wirkstoff W2 verstärkt die Spaltdruckwirkung der Porenlösung hierbei mehr als Wirkstoff W1.

Zudem verstärkt die durch die SRA-Wirkstoffe hervorgerufene erhöhte relative Feuchte die Spaltdruckwirkung der Porenlösung. Auch hierbei ist der Beitrag des Wirkstoffs W2 größer als von Wirkstoff W1, da die relative Feuchte im Zementstein unabhängig von der Zementart und dem Wasserzementwert größer war.

Bezug nehmend auf die Darstellungen der Primärbindungen und Sekundärbindungen zwischen Gelpartikeln in [Wit 77], ist in Bild 6-4 der Einfluss des Wirkstoffs W2 auf den Spaltdruck in konservierend gelagertem Zementstein schematisch dargestellt. Im linken Teil des Bildes sind Gelteilchen eines Zementsteins ohne SRA dargestellt. Ähnlich wie in Bild 2-5 dargestellt, bleibt bei einer inneren relativen Feuchte von rd. 90 % die Primärbindung zwischen den Teilchen geschlossen, wird aber durch die Anlagerung von Wassermolekülen etwas geschwächt. Der Abstand zwischen den Gelteilchen, die über eine Sekundärbindung miteinander verbunden sind, bleibt durch die Spaltdruckwirkung der Porenlösung bestehen. In den keilförmigen Spalten bilden sich Menisken aus Porenlösung aus.

Im rechten Teil von Bild 6-4 sind in der adsorbierten Porenlösung SRA-Moleküle verteilt. Bei konservierenden Bedingungen ist die relative Feuchte im Zementstein durch

die SRA etwas erhöht. Dies ist beispielhaft durch eine relative Feuchte von rd. 95 % dargestellt. Durch die hohe relative Feuchte im Zementstein erhält eine große Menge an kapillar kondensierter Porenlösung den Spaltdruck aufrecht. Die Oberflächenspannung der Porenlösung ist durch die SRA-Moleküle herabgesetzt. Dadurch vergrößert sich der Krümmungsradius der Menisken. Die Verteilung der SRA-Moleküle in der Porenlösung führt in deren direkten Umgebung zu einer Umstrukturierung der Wassermoleküle in der adsorbierten Schicht und in den Spalten zwischen den Gelteilchen (vgl. Bild 6-3).

Die Primärbindung (A) bleibt ähnlich wie bei der Porenlösung ohne SRA erhalten. Sie wird aber durch den flacheren Meniskus und die hydrophoben Wechselwirkungen der SRA-Moleküle etwas stärker gelockert. Die hydrophobe Wechselwirkung der SRA-Moleküle verstärkt den Spaltdruck zwischen den Gelteilchen mit Sekundärbindungen. In der Folge bleiben die gegenüberliegenden Oberflächen dauerhaft mit größerem Abstand voneinander getrennt. Dies trägt zu einem geringeren autogene Schwinden bei.

Gelteilchen mit Porenlösung ohne SRA

Gelteilchen mit SRA-Molekülen in der Porenlösung

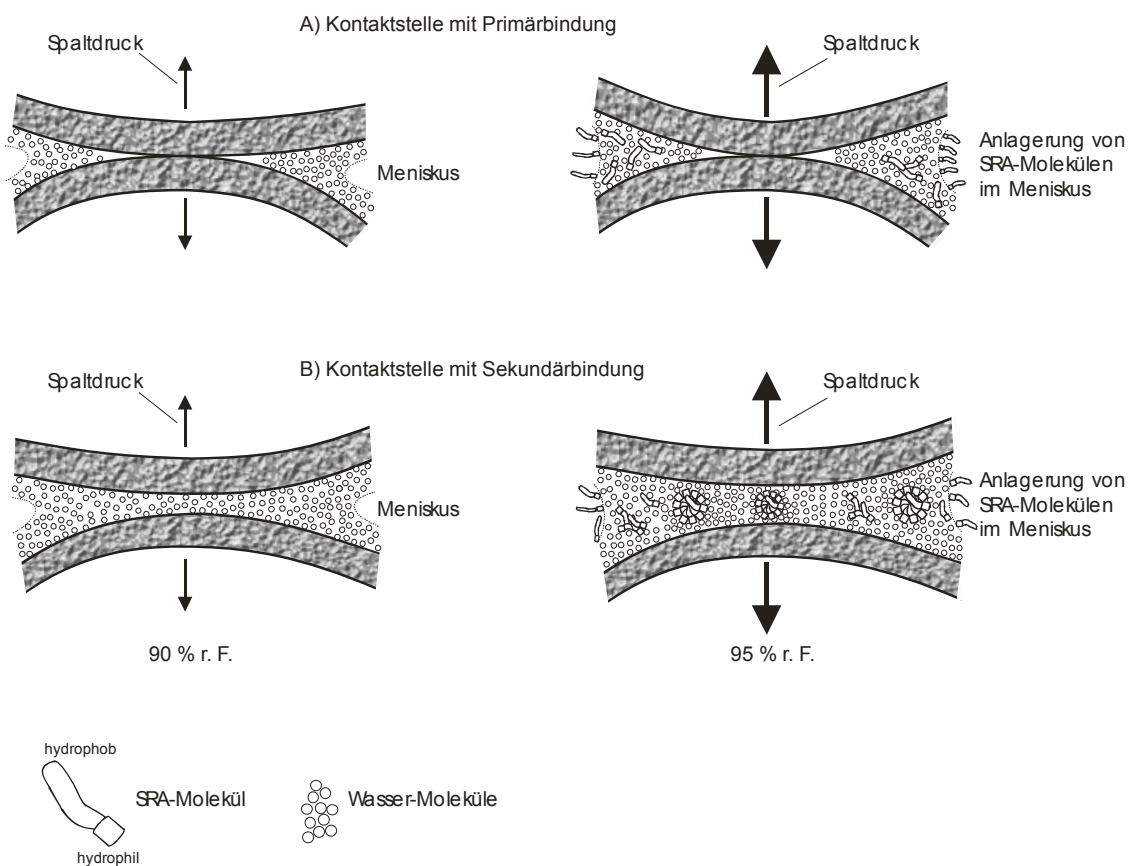


Bild 6-4 Schematische Darstellung des Einflusses von Wirkstoff W2 auf die Spaltdruckwirkung der Porenlösung zwischen zwei benachbarten Gelteilchen in Anlehnung an [Wit 77]

Die Anziehungskräfte können zunehmen, wenn Abstände der Oberflächen des Zementsteins zueinander geringer werden. Deshalb kann auch die Spaltdruckwirkung der Porenlösung mit geringer werdendem Abstand der Gelteilchen zueinander abnehmen. Insbesondere durch den Wirkstoff W1 wurde die Gelporosität erhöht. Dadurch nahm die Spaltdruckwirkung der Porenlösung insbesondere in Zementstein mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,25$ ab.

Reduzierung des autogenen Schwindens

Die bisherige Annahme, die Abminderung des Schwindens sei auf die Reduzierung der Oberflächenspannung der Porenlösung zurückzuführen, ist nur bedingt zutreffend. Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Reduzierung der Oberflächenspannung der Porenlösung mit beginnender Austrocknung (sowohl innere Austrocknung als auch Verdunstung von Wasser an die Umgebung) nur teilweise das autogene Schwinden reduziert. Langfristig reduzieren SRA das autogene Schwinden von Zementstein, indem sie die Spaltdruckwirkung der Porenlösung verstärken.

Das autogene Schwinden von Zementstein mit Wirkstoff W2 wurde unabhängig von der Zementart und vom Wasserzementwert reduziert. Maßgeblich tragen die Wechselwirkung der Moleküle in der Porenlösung und die erhöhte relative Luftfeuchte dazu bei, dass der Spaltdruck zwischen den Gelpartikeln des Zementsteins nicht oder nur in geringem Maße abgebaut wird. Die deutlich reduzierten Kapillarspannungen können den Spaltdruck zusätzlich verstärken.

Im Gegensatz dazu wurde das autogene Schwinden von Zementstein mit Wirkstoff W1, insbesondere bei einem Wasserzementwert von $w/z = 0,25$ und mit den untersuchten Zementen CEM I-HS, CEM II und CEM III nicht reduziert und teilweise erhöht. Die Wechselwirkungen der SRA Wirkstoff-Moleküle und die erhöhte innere relative Feuchte verstärken zwar die Spaltdruckwirkung der Porenlösung, jedoch kann ein erhöhter Gelporenanteil dem entgegen wirken und zu einem Abbau des Spaltdrucks beitragen. Dadurch kann das autogene Schwinden sogar verstärkt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Ausgangssituation

In der Literatur wird vielfach davon ausgegangen, dass die Wirkung von schwindreduzierenden Zusatzmitteln (SRA) auf die Herabsetzung der Oberflächenspannung des Kapillarporenwassers zurückzuführen ist.

In systematischen Untersuchungen wurde der Frage nachgegangen, ob ein direkter Zusammenhang zwischen der Reduzierung der Oberflächenspannung der Porenlösung und der Reduzierung des autogenen Schwindens von Zementstein besteht. Zudem wurden die Einflüsse von SRA auf das Porensystem, die innere relative Feuchte und das Trocknungsschwinden bei unterschiedlicher relativer Luftfeuchte untersucht.

Anhand der Untersuchungsergebnisse wurde ein qualitatives Modell abgeleitet, mit dem die Wirkungsmechanismen der SRA erklärt werden können.

7.2 Eigenschaften von Schwindreduzierern und deren wässriger Lösungen

Bedingt durch den unpolaren Charakter der SRA-Moleküle und deren Wechselwirkung in Wasser wurde die Oberflächenspannung von Wasser herabgesetzt. Moleküle mit höheren Anteilen an unpolaren Methyl-Gruppen, so in SRA2, SRA3 und W2 der Fall, setzten bei Konzentrationen von rd. 15 M.-% v. w bis rd. 20 M.-% v. w die Oberflächenspannung von Wasser um bis zu rd. 60 % herab. Bei diesen Konzentrationen war die kritische Mizellbildungskonzentration [Sch 72] erreicht, und höhere Dosierungen führten zu keiner weiteren Reduzierung der Oberflächenspannung.

Moleküle mit geringeren Anteilen an unpolaren Methylgruppen (SRA1 und W1) riefen eine geringere Reduzierung der Oberflächenspannung von Wasser, um bis zu rd. 30 % bis rd. 40 % (bei 20 M.-% v. w) hervor. Die kritische Mizellbildungskonzentration stellte sich bei diesen Molekülen zwischen 50 M.-% v. w und 100 M.-% v. w ein.

7.3 Einfluss von SRA auf die Zementleimeigenschaften

Die Konsistenz von Zementleimen und der Luftgehalt wurden durch SRA nicht signifikant beeinflusst.

7.4 Einfluss von SRA auf die Eigenschaften von Zementstein bei konservierenden Lagerungsbedingungen

7.4.1 Porenlösung

Die Oberflächenspannung der Porenlösung von Zementstein wurde dauerhaft durch die gewählten Schwindreduzierer und Wirkstoffe um bis zu 60 % herabgesetzt. Ab einem Alter von 28 Tagen entsprachen die jeweiligen Oberflächenspannungen der Porenlösung in etwa den Oberflächenspannungen der entsprechenden wässrigen Lösungen. Danach veränderte sich die relative Oberflächenspannung der Porenlösung unabhängig vom jeweiligen verwendeten Zusatzmittel, vom Wasserzementwert und von der Zementart nicht mehr.

Die SRA-Konzentration in der Porenlösung von konservierend gelagerten Zementsteinen stieg bis zu einem Alter von einem Jahr von rd. 4,5 % auf rd. 15 % bis rd. 20 % bezogen auf die Porenlösung unabhängig von der Zementart an. Diese Zunahme der Konzentration wurde auf die Einbindung von Wasser in Hydratationsprodukte zurückgeführt, wobei der Großteil der Schwindreduzierer offensichtlich nicht an Zement oder dessen Reaktionsprodukten sorbiert wurde. Dies führte mit zunehmendem Hydratationsfortschritt zu einer Abnahme der freien Wassermenge im Porengefüge und somit zu dem beobachteten Anstieg der SRA-Konzentration.

7.4.2 Autogenes Schwinden

Die Wirkung der Schwindreduzierer und deren Wirkstoffe war abhängig vom Zementsteinalter, von der Zementart und vom Wasserzementwert.

Das autogene Schwinden von Zementstein mit $w/z = 0,25$; $w/z = 0,42$ und $w/z = 0,50$ wurde durch die handelsüblichen Schwindreduzierer SRA1, SRA2 und SRA3 sowie den Wirkstoff W2 im Alter von 182 Tagen um bis zu 77 % reduziert. Die Wirkung von Wirkstoff W1 ging in Abhängigkeit von der Zementart und des Wasserzementwerts teilweise vollständig verloren. In einigen Fällen wurden größere autogene Schwindverformungen ermittelt als bei den jeweiligen Referenzproben ohne Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff.

Die schwindreduzierende Wirkung des untersuchten handelsüblichen Schwindreduziers SRA3 ist vermutlich hauptsächlich auf den darin zu rd. 50 % enthaltenen Wirkstoff W2 zurückzuführen. Der Beitrag des Wirkstoffs W1 an der schwindreduzierenden Wirkung von SRA3 war dagegen gering.

Ein Zusammenhang zwischen der Reduzierung des autogenen Schwindens und der relativen Oberflächenspannung der Porenlösung wurde nicht ermittelt.

7.4.3 Porengefüge

Durch den handelsüblichen Schwindreduzierer SRA3 wurden in Bezug auf die jeweiligen Referenzproben ohne SRA die Anteile an Gelporen im Zementstein erhöht und die

Anteile an Kapillarporen verringert. Die Gesamtporosität verringerte sich nur geringfügig. Diese Veränderung der Porenradienverteilung war im Wesentlichen auf die Wirkung des in SRA3 enthaltenen Wirkstoffs W1 zurückzuführen. Der Wirkstoff W1 erhöhte die Anteile an Gelporen und verringerte die Anteile an Kapillarporen deutlich. Die Veränderungen des Porensystems, die durch den Wirkstoff W2 im Zementstein hervorgerufen wurden, waren vergleichsweise gering.

7.4.4 Innere relative Feuchte

Durch die Schwindreduzierer und deren Wirkstoffe stellte sich in den Zementsteinen bei konservierender Lagerung eine höhere Ausgleichsfeuchte ein als in den jeweiligen Referenzproben ohne Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff. Die innere relative Feuchte war im Alter von 91 Tagen um bis zu 7,4 % r. F. ($w/z = 0,42$) bzw. um bis zu 13,3 % r. F. ($w/z = 0,25$) größer als in der jeweiligen Referenzprobe.

7.4.5 Übergreifende Zusammenhänge

Auf Grund der höheren inneren relativen Luftfeuchte und des erhöhten molaren Volumens der Porenlösung standen die Zementsteine mit Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff bei größeren Sättigungsradialen mit der relativen Feuchte im Gleichgewicht, als die jeweiligen Zementsteine ohne SRA.

Durch größere Sättigungsradialen und ein feineres Porensystem war der Anteil an Poren, in dem durch innere Austrocknung Kapillarspannungen entstehen können (wirksamer Porenanteil) in Zementstein mit Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff geringer als in jeweiligen Referenzproben ohne SRA. Somit blieb ein größerer Anteil der Poren von Zementstein mit SRA wasserdampfgesättigt.

Spannungen, die im Kapillarporensystem von Zementstein durch die Oberflächenspannung der Porenlösung hervorgerufen werden können, wurden durch Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff reduziert. Unabhängig von der Zementart, dem Wasserzementwert und der verwendeten SRA waren die wirksamen Kapillarspannungen mit Berücksichtigung des (spannungs)wirksamen Porenanteils um rd. 70 % bis 100 % kleiner als in den jeweiligen Zementsteinen ohne Schwindreduzierer.

Ein direkter Zusammenhang zwischen den ermittelten Kapillarspannungen und dem autogenen Schwinden bestand nicht.

7.5 Einfluss von SRA auf das Trocknungsschwinden von Zementstein und Mörtel

Das Trocknungsschwinden von Zementstein wurde durch Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff im Wesentlichen bei einer relativen Luftfeuchte zwischen 86 % r. F. und 44 % r. F. reduziert. Unterhalb von rd. 44 % r. F. änderte sich die schwindreduzierende Wirkung nicht mehr wesentlich. Daraus wurde abgeleitet, dass die Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff im Wesentlichen die Spaltdruckwirkung der Porenlösung verstärken und

damit das Schwinden reduzieren. Die Zunahme der Grenzflächenenergie mit sinkender relativer Umgebungsfeuchte wurde durch die SRA nicht beeinflusst.

Die durch SRA reduzierte Oberflächenspannung trug nur bei weitestgehender Wassersättigung des Porensystems deutlich zur Reduzierung des Trocknungsschwindens bei. Mit sinkender relativer Umgebungsfeuchte, bei der die Verdunstung des Porenwassers im Wesentlichen diffusionsgesteuert abläuft, war der Einfluss der Oberflächenspannung gering.

7.6 Modell zu den Wirkungsmechanismen schwindreduzierender Zusatzmittel und Wirkstoffe

Die bisherige Annahme, die Abminderung des Schwindens sei nur auf die Reduzierung der Oberflächenspannung der Porenlösung zurückzuführen, ist nur bedingt zutreffend.

Während der Hydratation von Zement wird Wasser verbraucht und in Hydratphasen eingebaut. Dadurch reichern sich SRA-Moleküle auf Grund ihres unpolaren Charakters in der Porenlösung des Zementsteins an. Sie verstärken dabei die Spaltdruckwirkung der Porenlösung zwischen den Gelpartikeln und vermindern das autogene Schwinden von Zementstein.

Ein Einfluss der SRA-Moleküle auf die Grenzflächenenergie des Zementsteins wurde nicht festgestellt. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass die reduzierte Oberflächenspannung der Porenlösung nur bei hoher Wasserdampfsättigung des Zementsteins im jungen Alter einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an der schwindreduzierenden Wirkung von SRA hat. Langfristig ist jedoch der erhöhte Spaltdruck der Porenlösung maßgeblich für die schwindreduzierende Wirkung der SRA verantwortlich.

7.7 Kritische Bewertung der marktüblichen SRA

Die Ergebnisse an Zementstein mit Portlandzement zeigten, dass marktübliche schwindreduzierende Zusatzmittel das autogene Schwinden von Zementstein reduzieren können. Im Folgenden sind einige Hinweise für die weitere Entwicklung von SRA insbesondere für die Anwendung in Mörtel und Beton aufgeführt:

- SRA sollten bei baupraktischen Dosiermengen (4 bis 5 M.-% v. w) eine ausreichende Löslichkeit in Wasser aufweisen, um mit dem Wasser homogen im Beton verteilt zu werden. Gleichzeitig sollte nach derzeitigem Kenntnisstand eine hohe hydrophobe Wechselwirkung mit der Porenlösung vorliegen, um die Spaltdruckwirkung zu verstärken.
- In SRA neuerer Generation können schwindreduzierende Eigenschaften und Eigenschaften, die die Verarbeitbarkeit von Mörtel und Beton verbessern, kombiniert werden. Aktuelle Entwicklungen verschiedener Hersteller von schwindreduzierenden Fließmitteln sind hierbei beispielhaft.

- Unter der Annahme, dass die Wirkungsmechanismen der SRA beim Trocknungsschwinden denen des autogenen Schwindens entsprechen, ist die Entwicklung von SRA zu empfehlen, die im Wesentlichen den Spaltdruck der Porenlösung dauerhaft erhöhen. Gleichzeitig dürfen SRA nicht wesentlich die mechanischen und dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften beeinträchtigen. Eine Auslaugung von SRA aus Zementstein und Beton ist möglichst zu minimieren, um eine dauerhafte Schwindreduzierung sicherzustellen, aber auch, um hygienischen und Anforderungen an die Umweltverträglichkeit gerecht zu werden.

7.8 Ausblick

Die Ausführungen im Abschnitt 5.3 „Einfluss von SRA auf die Eigenschaften von Zementstein bei konservierenden Lagerungsbedingungen“ haben gezeigt, dass sich die Porenradienverteilung durch SRA teilweise stark veränderte. Worauf diese Veränderungen zurückzuführen sind, konnte nicht abschließend geklärt werden. Aufschluss darüber könnten tiefer gehende Untersuchungen des Hydratationsverhaltens der Hauptklinkerphasen in Anwesenheit von SRA-Wirkstoffmolekülen geben.

Es wurde gezeigt, dass SRA die Spaltdruckwirkung der Porenlösung erhöhen können. Ziel weiterführender grundlegender Forschungsarbeiten sollte es sein zu klären, welche Komponenten des Spaltdrucks hierbei beeinflusst werden. Mit Hilfe von Sorptionsisothermen kann hierbei der Einfluss von SRA-Molekülen auf die Eigenschaften der Porenlösung und deren Wechselwirkung mit Zementstein bestimmt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass handelsübliche Schwindreduzierer und darin enthaltene Wirkstoffe das Schwinden von Zementstein reduzieren können. In welchem Maße sich die am Zementstein festgestellte Wirkung der Schwindreduzierer auf entsprechend zusammengesetzte Betone übertragen lässt, wird derzeit im Forschungsinstitut der Zementindustrie untersucht. Ziel ist es zu klären, ob der Einsatz von SRA zu einer anhaltenden Reduzierung des Schwindens von Beton führt, ohne die Dauerhaftigkeit zu beeinträchtigen.

Ein Schwerpunkt der Arbeiten besteht darin, das Gesamtschwinden von normalfesten Betonen in Konstantklimaten als auch bei wechselnden Lagerungsbedingungen zu untersuchen. Dem frühen Schwinden und der Rissbildung von großflächigen Bauteilen, wie Bodenplatten und Estrichen kann möglicherweise durch SRA gezielt entgegengewirkt werden.

Die geringen Wasserzementwerte von hochfesten und ultrahochfesten Betonen führen zu einer starken Selbst austrocknung und damit verbundenen zu einem hohen Anteil an autogenem Schwinden. Da die Zugfestigkeit des Betons im jungen Alter sehr gering ist, können diese beiden Phänomene zu einer starken Rissempfindlichkeit hochfester und ultrahochfester Betone im jungen Alter führen. Systematische Untersuchungen des freien sowie des behinderten autogenen Schwindens von hochfesten und ultrahochfesten Betonen mit schwindreduzierenden Zusatzmitteln werden derzeit im Forschungsinstitut

durchgeführt und sollen zur Klärung der Frage beitragen, ob die Empfindlichkeit derartiger Betone gegenüber Rissbildung im jungen Alter durch SRA verbessert werden kann.

Die Verfeinerung des Porensystems gibt Grund zu der Annahme, dass sich dauerhaftigkeitsrelevante Betonparameter verbessern können. Hierzu werden derzeit Untersuchungen zum Widerstand von Betonen mit SRA gegenüber dem Eindringen von Flüssigkeiten und Gasen durchgeführt.

SRA werden offenbar nicht in die Hydratationsprodukte eingebunden und liegen gelöst in der Porenlösung vor. Vor diesem Hintergrund wird der Frage nachgegangen, ob Schwindreduzierer das Schwinden unter baupraktischen Bedingungen, wie zum Beispiel bei wechselnden Feuchtigkeitsverhältnissen, anhaltend reduzieren können, oder ob eine Auslaugung zu einer Abnahme der Wirkung führt.

8 Literaturverzeichnis

8.1 Literatur

- [Ai 97] Ai, H.; Young, F.J.: *Mechanisms of shrinkage reduction using a chemical admixture: Utilisation of admixtures; water reducers, air entrainers, accelerators, retarders and polymers - Mechanisms; admixture chemical <-> cement interaction*. In: Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement: Volume 3: Additives, admixtures, characterisation techniques / Justnes, Harald (Hrsg.). - Göteborg : Amarkai AB Congress Göteborg AB, 1997.
- [AiF 06] *Wirkungsmechanismen von schwindreduzierenden Zusatzmitteln*: AiF-Abschlussbericht. – Düsseldorf, 2006
- [Ait 97] Aitcin, P.C.; Neville, A.M.; Acker, P.: *Integrated view of shrinkage deformation*. In: Concrete International 19 (1997) 9, S. 35-41
- [Alm 04] Al-Manaseer, A.; Ristanovic, S.: *Predicting drying shrinkage of concrete : ALSN 2004 model incorporates new parameter to account for effects of shrinkage-reducing admixtures*. In: Concrete International 26 (2004) 8, S. 79-83
- [Alo 02] Alonso, M.T.: *Hochfester Beton*. In: Beton 52 (2002) 11, S. 563-567 und 52 (2002) 12, S. 621-624
- [Bae 02] Bae, J.; Berke, N.S.; Hoopes, R.J.; Malone, J.: *Freezing and thawing resistance of concretes with shrinkage reducing admixtures*. In: Frost resistance of concrete : from nano-structure and pore solution to macroscopic behaviour and testing ; Proceedings of the international RILEM workshop; Essen, Germany, 18 - 19 April 2002 / ed. by Max Josef Setzer. Cachan, France : RILEM Publications, 2002 (RILEM proceedings : PRO 24), S. 327-334
- [Bal 96] Balogh, A.: *New Admixture combats concrete shrinkage: At last, a liquid admixture that's designed to reduce materials shrinkage due to drying*. In: Concrete construction (1996) July, S. 546-551
- [Bar 99] Baroghel-Bouny, V.; Mainguy, M.; Lassabatere, T.; Coussy, O.: *Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials*. In: Cement and Concrete Research 29 (1999) 8, S. 1225-1238

- [Bel 05] Beltzung, Françoise; Wittmann, Folker H.: *Role of disjoining pressure in cement based materials*. In: Cement and Concrete Research 35 (2005) 12, S.2364-2370
- [Ben 95] Bentz, D. P.; Quenard, D. A.; Baroghel-Bouny, V.; Garboczi, E. J.; Jennings, H. M.: *Modelling drying shrinkage of cement paste and mortar : Part 1. Structural models from nanometres to millimetres*. In: Materials and Structures 28 (1995) 182, S.450-458
- [Ben 01] Bentur, A.; Berke, N.S.; Dallaire, M.P.; Durning, T.A.: *Crack mitigation effects of shrinkage reducing admixtures*. In: Design and construction practices to mitigate cracking: National Symposium of the American Concrete Institute; (San Diego, Calif.) : ca. 2000 / ed.: Edward G. Nawy - Farmington Hills, Mich. : ACI International, 2001. - VI, 280 S. - (ACI International SP ; 204), S. 155-170
- [Ben 01a] Bentz, D.P.; Geiker, M.R.; Hansen, K.K.: *Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars*. In: Cement and Concrete Research 31 (2001) 7, S. 1075-1085
- [Ber 01] Berke, N.S.; Malone, J.; Rieder, K.A.; Yang, W.: *Effects of shrinkage reducing admixtures on shrinkage and cracking of concrete*. In: Creep, shrinkage and durability mechanics of concrete and other quasi-brittle materials: proceedings of the sixth international conference, CON-CREEP-6@MIT, 20-22 August 2001, Cambridge (MA), USA / edited by F.-J. Ulm, Z.P. Bazant, and F.H. Wittmann. - 1. ed. - Amsterdam [u.a.] : Elsevier, 2001. - XVIII, 811 S., S. 671-677
- [Ber 03] Berke, N.S.; Li, L.; Hicks, M.C.; Bae, J.: *Improving concrete performance with shrinkage-reducing admixtures*. In: Seventh CANMET/ACI International conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete / Malhotra, V.M. (Hrsg.). - Farmington Hills, Mi.: American Concrete Institute, ACI, 2003. - (ACI Publication SP 217), S. 37-50
- [Ber 97] Berke, N.S.; Dallaire, M.P.; Hicks, M.C.; Kerkar, A.: *New developments in shrinkage-reducing admixtures*. In: Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete : – Proceedings 5th CANMET/ACI International conference, Rome Italy, 1997. – Malhotra, V.M. (ed.). – ACI International SP-173, S. 971-997
- [Ber 98] Berke, N.; Dallaire, M.; Simpson, B.: *Performance of shrinkage reducing admixture*. In: Proceedings of the 12th European ready mixed concrete congress, Lissabon, Portugal, 23-26 June, Vol 2.- Lissabon: Portuguese Ready Mixed Concrete Association, APEB, 1998, S. 904-913

- [Big 99] Bigley, C.: *Controlling shrinkage in concrete mixes*. In: Concrete 33 (1999) 4, S. 38-39
- [Böh 02] Böhm, H.-J.; Klebe, G.; Kubinyi, H.: *Wirkstoffdesign: Der Weg zum Arzneimittel*. - Unveränd. Nachdr. d. 1. Aufl. 1996. - Heidelberg; (u.a.) : Spektrum Akad. Verl., 2002. - (Spektrum Lehrbuch)
- [Brö 76] Bröker, F.W.; Simatupang, M.H.: *Zum Einfluß von Polyäthylenglycol auf einige physikalische Eigenschaften des Portlandzementsteins*. In: Zement-Kalk-Gips 29 (1976) 2, S. 65-70
- [Bro 97] Brooks, J.J.; Jiang, X.: *The influence of chemical admixtures on restrained drying shrinkage of concrete*. In: Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete: Proceedings Fifth CANMET/ACI International Conference Rome, Italy, 1997 / Malhotra, V.M. (Hrsg.). - Detroit, Mi.: American Concrete Institute, ACI, 1997. - (ACI Publication SP 173), S. 249-265
- [Buf 00] Buffenbarger, J.K.; Nmai, C.K.; Miltenberger, M.A.: *Improving Watertightness of Reinforced Concrete Structures With Shrinkage-Reducing Admixtures*. In: Design and construction practices to mitigate cracking: National Symposium of the American Concrete Institute; (San Diego, Calif.): ca. 2000 / ed.: Edward G. Nawy - Farmington Hills, Mich.: ACI International, 2001. - VI, 280 S. - (ACI International SP; 204), S. 217-236
- [Cer 01] Cerulli, T.; Pistolesi, C.; Maltese, C.; Salvioni, D.: *Effects of shrinkage reducing admixtures on the physical mechanical properties of mortars*. In: Proceedings of the Twenty-Third International Conference on Cement Microscopy: Sheraton Uptown, Albuquerque, New Mexico, [April 29 to May 4, 2001] / ed. by: Jany, Louis. – Metropolis, Ill. : ICMA, International Cement Microscopy Association, 2001, S. 58-76
- [Cha 94] Chartschenko, I.: *Theoretische Grundlagen zur Anwendung von Quellszement in der Baupraxis*. - Weimar, Univ., Habil.-Schr., 1994
- [Chu 00] Churaev, N.V. (2000): *Liquid and Vapor Flows in Porous Bodies : Surface Phenomena*. Bd. 13 von Topics in Chemical Engineering. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2000
- [Col 06] Collepari, M.; Borsoi, A.; Collepari, S.; Troli, R.: *Self-Curing, Shrinkage-Free Concrete*. In: Sixth CANMET/ACI International conference on durability of concrete / Malhotra, V.M. (Hrsg.). - Farmington Hills, Mi. : American Concrete Institute, ACI, 2006. - (ACI Special Publication, SP-234-47), S. 755-764

- [Cop 01] Cope, B.L.; Ramey, G.E.: *Reducing Drying Shrinkage of Bridge-Deck Concrete*. In: Concrete International 23 (2001) 8, S. 76-82
- [Cze 77] Czernin, W.: *Zementchemie für Bauingenieure*. 3. neuüberarb. Aufl. – Wiesbaden: Bauverl., 1977. – ISBN 3-7625-0388-5
- [Der 87] Derjaguin, B.V.; Churaev, N.V.; Muller, V.M.: *Surface Forces*. New York: Consultants Bureau, (1987)
- [Dso 00] D'Souza, B.: *Shrinkage-reducing admixtures*. – o.o.n.J., 12 S.
- [Dud 08] Dudziak, L.; Mechtcherine, V.: *Mitigation of volume changes of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) by using Super Absorbent Polymers*. In: Ultra High Performance Concrete (UHPC): Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete Kassel, Germany March 05-07, 2008 / Fehling, Ekkehard; Schmidt, Michael; Stürwald, Simone (eds.). - Kassel : Univ. Pr., 2008. - (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau 10), S. 425-432
- [Duc 08] Duckheim, C.: *Hygrische Eigenschaften des Zementsteins*. 1. Aufl. . Göttingen: Cuvillier, 2008 (Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft <Essen>: Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft 13)
- [Ebe 06] Eberhardt, A.B.; Kaufmann, J.: *Development of Shrinkage Reduced Self Compacting Concrete*. In: Eight CANMET/ACI international conference on recent advances in concrete technology / Malhotra, V.M. (Hrsg.). - Detroit, Mi.: American Concrete Institute, ACI, 2006. - (ACI Publication SP 235), S. 13-30
- [Ebe 06a] Eberhardt, A.B.; Kaufmann, J.P.: *Schwindreduzierter Selbstverdichtender Beton*. In: 16. Internationale Baustofftagung, IBAUSIL, 20. - 23. September 2006, Weimar, Bundesrepublik Deutschland : Bd. 2 / Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.). - Weimar, 2006, S. 2-0117-2-0124
- [Eng 97] Engstrand, J.: *Shrinkage reducing admixture for cementitious compositions*. In: ConChem-Journal 5 (1997) 4, S. 149-151
- [Epp 08] Eppers, S.; Müller, C.: *Autogenous shrinkage strain of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC)* In: Ultra High Performance Concrete (UHPC) : Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete Kassel, Germany March 05-07, 2008 / Fehling, E.; Schmidt, M. ; Stürwald, S. (eds.). - Kassel : Univ. Pr., 2008. - (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau 10), S. 433-441

- [Fel 68] Feldman, R.F.; Sereda, P.J.: *A model for hydrated portland cement paste as deduced from sorptiom-length change and mechanical properties*. In: Matériaux et Constructions 1 (1968) 6, S. 509-520
- [Fer 87] Ferraris, C.F.; Wittmann, Folker H.: *Shrinkage mechanisms of hardened cement paste*. In: Cement and Concrete Research 17 (1987) 3, S.453-464
- [Fol 97] Folliard, K.J.; Berke, N.S.: *Properties of high-performance concrete containing shrinkage-reducing admixture*. In: Cement and Concrete Research 27 (1997) 9, S. 1357-1364
- [Fon 06] Fontana, P.: *Einfluss der Mischungszusammensetzung auf die frühen autogenen Verformungen der Bindemittelmatrix von Hochleistungsbetonen*. - 1. Aufl. - Berlin; (u.a.) : Beuth, 2007. - (DAfStb: Schriftenreihe 570)
- [Fuj 94] Fujiwara, H.; Tomita, R.; Shimoyama, Y.: *A study of frost resistance of concrete using an organic shrinkage-reducing agent*. In: Durability of Concrete : Third International Conference: Nice, France 1994 / Malhotra, V.M. American Concrete Institute, ACI (Hrsg.). - Detroit, Mi.: American Concrete Institute, ACI, 1994. - (ACI Publication 145), S. 643-655
- [Get 03] Gettu, R.; Roncero, J.: *Behavior of concretes with shrinkage reducing admixtures*. In: Yuan, Yingshu (Ed.): International Conference on Advances in Concrete and Structures: ICACS 2003, Xuzhou, Jiangsu, China, 17 - 19 September 2003.- Bagneux: RILEM Publ., 2003 (RILEM proceedings PRO 32), S. 11-20
- [Gru 03] Grube, H.: *Definition der verschiedenen Schwindarten, Ursachen, Größe der Verformungen und baupraktische Bedeutung*. In: Beton 53 (2003) 12, S. 598-603
- [Gru 91] Grube, H.: *Ursachen des Schwindens von Beton und Auswirkungen auf Betonbauteile*. Düsseldorf: Beton-Verlag, 1991. - (Schriftenreihe der Zementindustrie 52)
- [Gut 20] Patentschrift: Guttman, A.: *Verfahren zur Herstellung eines schwindfreien Betons*. DRP Nr. 330 784, 1920
- [Jae 68] Jaegermann, C.H.; Glücklich, J.: *Effect of plastic shrinkage on subsequent shrinkage and swelling of hardened concrete*. - RILEM, International colloquim on the shinkage of the hydraulic concretes Madrid 1968, Vol.I, I-B.

- [Jci 98] Japan Concrete Institute: *Technical committee report on autogenous shrinkage of concrete*. (1996, in Japanisch). In Auszügen übersetzt ins Englische in: Autogenous shrinkage of concrete. Proceedings of the international workshop organized by JCI, Hiroshima, Japan, Juni 1998.
- [Jen 00] Jennings, H.M.: *A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste*. In: Cement and Concrete Research 30 (2000) 1, S. 101-116
- [Jen 01] Jensen, O.M.; Hansen, P. F.: *Water-entrained cement-based materials*. In: Cement and Concrete Research 31 (2001) 4, S. 647-654
- [Jen 02] Jensen, O.M.; Hansen, P.F.: *Water-entrained cement-based materials*. In: Cement and Concrete Research 32 (2002) 6, S. 973-978
- [Jen 04] Jennings, H.M.: *Colloid model of C-S-H and implications to the problem of creep and shrinkage*. In: Materials and Structures/Materiaux et Constructions 37 (2004) 265, S. 59-70
- [Jen 95] Jensen, O.M.: *Thermodynamic limitation of self-dessication*. In: Cement and Concrete Research 25 (1995) 1, S. 157-164
- [Jen 96] Jensen, O.M.; Hansen, P. F.: *Autogenous Deformation and Change of the Relative Humidity in Silica Fume-Modified Cement Paste*. In: ACI Materials Journal 93 (1996) 6, S.539-543
- [Jus 00] Justnes, H., Clemmens, F., Depuydt, P., van Gemert, D., Sellevold, E. J.: *Correlating the deviation point between external and total chemical shrinkage with setting time and other characteristics of hydrating cement paste*. In: Shrinkage of Concrete, Proceedings of the International RILEM Workshop, Paris, Frankreich, Oktober 2000, S. 57-73.
- [Klu 73] Klug, P.: *Kriechen, Relaxation und Schwinden von Zementstein*.- München, Techn. Univ., Diss., 1973
- [Loc 00] Locher, F.W.: *Zement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung*.- Düsseldorf: Verlag Bau – Technik, 2000
- [Lüc 01] Lücke, A.: *Untersuchungen zur Wirkungsweise organischer Schwindreduzierer*.- Weimar, Univ., Dipl.-Arb., 2001
- [Lur 03] Lura, P.; Jensen, O. M.; Breugel van, K.: *Autogenous shrinkage in high-performance cement paste*. In: Cement and Concrete Research 33 (2003) 2, S. 223-232
- [Lur 03a] Lura, P.: *Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete*.- Delft, Techn. Univ., Diss., 2003

- [Mal 05] Maltese, C.; Pistolesi, C.; Lolli, A.; Bravo, A.; Cerulli, T.; Salvioni, D.: *Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars*. In: Cement and Concrete Research 35 (2005) 12, S. 2244-2251
- [Mal 06] Maltese, C.; Lolli, A.; Pistolesi, C.; Bravo, A.; Cerulli, T.: *Combined Effect of Expansive and shrinkage reducing admixtures on microstructure of mortars and concretes*. In: Seventh CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete / Malhotra, V.H. (Ed.). - Farmington Hills, Mich. : ACI International, 2006 (SP ; 234), S. 781-795
- [Man 60] Manegold, E.: *Kapillarsysteme*: Band 2: Staßenbau, Chemie und Technik.- Heidelberg: Verl.-ges., 1960
- [Man 77] Manns, W.; Harmann, E.: *Zum Einfluß von Mineralölen auf die Festigkeit von Beton*. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1977), 298, S. 35-67
- [Mec 06] Mechtcherine, V.; Dudziak, L.; Schulze, J.; Staehr, H.: *Internal curing by Super Absorbent Polymers (SAP)*. In: Volume changes of hardening concrete: testing and mitigation: international RILEM conference; Lyngby, Denmark, 20 - 23 August 2006 / ed. by Jensen, Ole Mejlhede. - Bagneux : RILEM Publications, 2006. - (RILEM proceedings : PRO 52)
- [Mor 01] Mora, J.; Martin, M.A.; Gettu, R.; Aguado, A.: *Study of plastic shrinkage cracking in concrete and the influence of fibers and a shrinkage reducing admixture*. In: L' Industria Italiana del cemento, 75 (2001) 11, S. 828-837
- [Mor 03] Mora, A.; Aguado, A.; Gettu, R.: *The influence of shrinkage reducing admixtures on plastic shrinkage*. In: Materiales de construcción 53 (2003) 271-272, S. 73-80
- [Nak 03] Nakanishi, H.; Tamaki, S.; Yaguchi, M.; Yamada, K.; Kinoshita, M.; Ishimori, M.; Okazawa, S.: *Performance of a multifunctional and multi-purpose superplasticizer for concrete*. In: Malhotra, V.M. (Ed.): Seventh CANMET/ACI international conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete. Farmington Hills, Mi.: American Concrete Institute, ACI, 2003.- (ACI Publication SP 217), S. 327-341
- [Nma 98] Nmai, C.K.; Tomita, R.; Hondo, F.; Buffenbarger, J.: *Shrinkage Reducing Admixtures*. In: Concrete International 33 (1998) 4, S. 31-37

- [Nog 05] Noguchi, T.; Sun-Gyu, P.; Maruyama, I.: *Mechanical properties of high-performance concrete with expansive additive and shrinkage reducing admixture under simulated completely-restrained condition at early age*. In: Self-Desiccation and Its Importance in Concrete Technology : Proceedings of the 4th International Seminar Proceedings of the Fourth International Research Seminar, Gaithersburg, Maryland, USA, June, 2005 / Persson, B. ; Bentz, D. ; Nilsson, L.-O. (Ed.). - Lund: Lund Institute of Technology, 2005. - (Report TVBM-3126), S. 67-77
- [Oga 93] Ogawa, A.; Tomita, R.: *Crack control of reinforced concrete structures*. In: Concrete 2000: Economic and durable construction through excellence; Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 07-09.09.1993; Volume 1: Design, Materials, Construction / Dhir, Ravindra K. Jones, Roderick M. (Hrsg.). - London (u.a.) : Spon, 1993, S. 433-446
- [Oga 95] Ogawa, A.; Sakata, K.; Tanaka, S.: *A study on reducing shrinkage of highly-flowable concrete*. In: Advances in Concrete Technology : Proceedings Second CANMET/ACI International Symposium, Las Vegas, Nevada, USA, 1995 / Malhotra, V.M. (ed.). - Detroit, Mich. : American Concrete Institute, ACI, 1995. - (ACI Publication; SP 154), S. 55-72
- [Oha 88] Ohama, Y.; Demura, K.; Satoh, Y.: *Drying shrinkage and strength of steel fiber reinforced polymer-modified mortars containing shrinkage-reducing agent*. In: Proceedings of the 31. Japan Congress on Materials Research Society of Materials Science Japan. Kyoto Society of Materials Science Japan, S. 81-86
- [Pea 05] Pease, B: *The role of shrinkage reducing admixtures on shrinkage, stress development, and cracking*. – Purdue Univ., Mast. Thes., 2005
- [Per 97] Persson, B.: *Moisture in concrete subjected to different kinds of curing*. In: Materials and Structures/Materiaux et Constructions 30 (1997) 203, S. 533-544
- [Pow 46] Powers, T.C.; Brownyard, T.L.: *Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste*. In: Journal of the American Concrete Institute 18 (1946) 4, S. 469-504
- [Pow 58] Powers, T.C.: *Structure and physical properties of hardend portland cement paste*. In: American Ceramic Society: Journal 41 (1958) 1, S.1-6

- [Pow 68] Powers, T. C.: *Mechanisms of shrinkage and reversible creep of hardened cement paste*. In: The structure of concrete and its behavior under load: Proceedings of an International Conference, London, September 1965 / Brooks, Anthony E.; Newman, Kenneth (eds.). - London : Cement and Concrete Association, CCA, 1968, S. 319-344
- [Raj 08] Rajabipour, F.; Sant, G.; Weiss, J.: *Interactions between shrinkage reducing admixtures (SRA) and cement paste's pore solution*. In: Cement and Concrete Research 38 (2008) 5, S. 606-615
- [Rei 02] Reinhardt, H.W.: *Autogenous and drying shrinkage of hybrid concrete*. In: Concrete Science and Engineering 4 (2002) 14, S. 77-83
- [Rib 03] Ribeiro, A.B.; Carrajola, A.; Goncalves, A.: *Effectiveness of shrinkage-reducing admixtures on different concrete mixtures*. In: Seventh CAN-MET/ACI international conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete. / Malhotra, V.M.- Farmington Hills, Mi.: American Concrete Institute, ACI, 2003 (ACI Publication SP 217), S. 299-309
- [Ric 04] Rickert, J.: *Zum Einfluss von Langzeitverzögerern auf der Basis von Phosphonsäure auf die Hydratation einzelner Klinkerphasen, Portlandzementklinker und Portlandzemente*. Düsseldorf: Verl. Bau und Technik, 2004 (Schriftenreihe der Zementindustrie 65)
- [Ron 05] Rongbing, B.; Jian, S.: *Synthesis and evaluation of shrinkage-reducing admixture for cementitious materials*. In: Cement and Concrete Research 35 (2005) 3, S. 445-448
- [San 06] Sant, G., Lura, P., Weiss, J.: *A discussion of analysis approaches for determining time-zero from chemical shrinkage and autogenous strain measurements in cement paste*. In: O.M. Jensen et al. (Hrsg.), Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation; Proceedings of the International RILEM Conference, Lyngby, Dänemark, August 2006, S. 375-384.
- [Sat 83] Sato, T.; Goto, T.; Sakai, K.: *Mechanism for reducing drying shrinkage of hardened cement by organic additives*. In: Review of the general meeting, technical session 1983 (1983), S. 52-55
- [Saw 85] Sawada, E.; Kaneko, M.: *Properties of some Kinds of Mortar for Plastering using organic shrinkage Reducing Agent*. In: Review of the General Meeting / Cement Association of Japan, CAJ. - S. 164-167 / 39 (1985)
- [Sch 07] Schäffel, P.; Rickert, J.: *Einfluss von schwindreduzierenden Zusatzmitteln auf das Schwinden und weitere Eigenschaften von Zementstein : Teil 1 ; Teil 2*. In: Beton 57 (2007) 6; 7-8, S.289-295; 359-365

- [Sch 72] Schwuger, M.J.: *Zur Wirkungsweise von Tensiden in technischen Prozessen*. In: Chemie-Ingenieur-Technik 44 (1972) 6, S. 374-378
- [Sch 98] Schlumpf, J.: *Das Schwindreduktionsmittel Sika (R) Control-40 im Einsatz im Birchitunnel der A5 : Tunnelbaubeton mit Sika (R) Control-40 im Kanton Solothun*. In: Schweizer Baublatt (1998) 70, o.S.
- [Sch 99] Schemmel, J.J.; Ray, J.C.; Kuss, M.L.: *Impact of Shrinkage Reducing Admixture on Properties and Performance of Bridge Deck Concrete*. In: High-performance concrete and performance and quality of concrete structures: proceedings, second CANMET/ACI international conference, Gramado, RS, Brazil, 1999 / ed.: V. M. Malhotra. - Farmington Hills, Mich. : ACI International, S. 367-386
- [Sei 01] Seigneur, V.; Bonneau, O.; Aitcin, P.-C.: *Influence of the curing regime and of a shrinkage reducing admixture on shrinkage*. In: Concrete Science and Engineering 3 (2001) 9, S. 47-52
- [Set 76] Setzer, M. J. : *A method for description of mechanical behaviour of hardened cement paste by evaluating adsorption data*. In: Cement and Concrete Research 6 (1976) 1, S.37-47
- [Set 77] Setzer, M. J.: *Einfluß des Wassergehalts auf die Eigenschaften des erhärteten Betons*. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1977) H. 280, S.43-117
- [Set 06] Setzer, M. J.; Duckheim, C.; Liebrecht, A.; Kruschwitz, J. : *The solid-liquid gel-system of hardened cement paste*. In: 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, 11.-13. September 2006, Quebec City, Canada, S.1-16
- [Set 06a] Setzer, M. J.: *Das Feststoff-Porenwassersystem des Zementgels : Solid-liquid gel-system SLGS-Modell*. In: 16. Internationale Baustofftagung, IBAUSIL, 20. - 23. September 2006, Weimar, Bundesrepublik Deutschland : Bd. 2, S.2-0683-0700
- [Sha 00] Shah, S.P.; Weiss, W.J.: *High performance concrete*. In: The economical solution for durable bridges and transportation structures: PCI/FHWA/FIB International symposium on high performance concrete; Symposium proceedings / Johal, L.S. (Hrsg.). - Chicago : Precast/Prestressed Concrete Institute, PCI, 2000, S. 331-339
- [Sha 92] Shah, S.P.; Karaguler, M.E.; Sarigaphuti, M.: *Effects of shrinkage-reducing admixtures on restrained shrinkage cracking of concrete*. In: ACI Materials Journal 89 (1992) 3, S. 289-295
- [Sha 98] Shah, S.P.; Weiss, W.J.; Yang, W.: *Shrinkage cracking - Can it be prevented?* In: Concrete International (1998) 4, S. 51-55

- [Sho 90] Shoya, M.; Sugita, S.; Sugawara, T.: *Improvement of drying shrinkage and shrinkage cracking of concrete by special surfactants*. Admixtures for concrete. Improvements of properties. In: Proceedings of the international RILEM-Symposium, Barcelona, Aug 14-17, 1990.- Lonon: Chapman and Hall, 1990, S. 484-495
- [Sta 00] Stark, J.; Wicht, B.: *Zement und Kalk : Der Baustoff als Werkstoff*. – Basel,: Birkhäuser, 2000.- (Baupraxis)
- [Sta 01] Stark, J.; Wicht, B.: *Dauerhaftigkeit von Beton*. – Basel,: Birkhäuser, 2001.- (Baupraxis)
- [Sta 01a] Stark, J.; Möser, B.; Eckart, A.: *Neue Ansätze zur Zementhydratation*. : Teil 1: Teil 2: In: Zement-Kalk-Gips 54 (2001) 1; 2, S.52-60; S.114-119
- [Sta 03] Stark, J.; Möser, B.; Bellmann, F.: *New approaches to cement hydration in the early hardening stage*. In: 11th International Congress on the Chemistry of Cement : Cement's contribution to development in the 21st century (International Congress on the Chemistry of Cement : 11 Durban 11.-16.05.2003) / Grieve, G. Owens, G. (Hrsg.). - Halfway House : Cement and Concrete Institute, 2003, 18 S.
- [Sto 76] Stockhausen, N.: *Van der Waals interaction and disjoining pressure between solid surfaces*. In: Hydraulic cement pastes: Their structure and properties ; Proceedings of a Conference held at Tapton Hall, University of Sheffield, 8 - 9 April 1976 / Cement and Concrete Association, C&CA (Hrsg.). - Waxham Springs, 1976- (Cement and Concrete Association: Publication 15.1212)
- [Str 00] Strahm, K.; Schlumpf, J.: *Schwindreduktion im Beton*. In: Schweizer Baublatt (2000) 11, S. 22-24
- [Sub 02] Subramanian, S.; Manohar, S.; Malliarjun, V.; Nagabhusana Rao, Bh.; Srinivasan, N.: *Use of admixtures for reducing autogenous shrinkage of concrete*. In: Innovations and developments in concrete materials and construction : Proceedings of the International Conference of the University of Dundee, Scotland, UK on 9-11 September 2002 / Dhir, Ravindra K. ; Hewlett, Peter C. ; Csetenyi, Laszlo J. (eds.). - London : Telford, 2002, S. 235-248

- [Sug 87] Sugiyama, M.; Tanaka, K.; Sakuta, M.; Urano, T.: *Durability of Concrete Containing a Shrinkage Reducing Admixture*. In: Concrete durability Katherine and Bryant Mather International Conference: Vol. 1, Vol. 2 (Katherine and Bryant Mather International Conference on/ Concrete Durability Atlanta 27.4.-1.5.1987) / Scanlon, John M. (Hrsg.). - Detroit, Mi. : American Concrete Institute, ACI, 1987. - (ACI Publication SP 100), S. 1103-1119
- [Sug 98] Sugiyama, M.; Ohta, A.; Tanaka, Y.: *Shrinkage Reduction Type of Advanced Superplasticizer*. In: Proceeding of the CANMET-ACI Symposium on Advances in Concrete Technology, 1998, S. 189-200
- [Tan 97] Tanaka, S.; Hohjoh, Y.; Yamaguchi, O.; Tomita, R.: *Long-term durability of concrete with an organic shrinkage reducing agent*. In: Durability of concrete: proceedings, fourth CANMET/ACI international conference, Sydney, Australia, 1997; Vol. 2 / Ed.: V. M. Malhotra. - Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute, 1997. - (ACI publication 170), S. 1577-1590
- [Taz 95] Tazawa, E.; Miyazawa, S.: *Influence of Cement and Admixture on Autogenous Shrinkage of Cement Paste*. In: Cement and Concrete Research 25 (1995) 2, S. 281-287
- [Taz 98] Tazawa, E.: *Autogenous shrinkage of concrete*. In: Proceedings of the international workshop organized by JCI (13.-14.06.1998) / Tazawa, E-ichi (Hrsg.). - London : Spon, 1999
- [Ten 00] Tennis, P.D.; Jennings, H.M.: *A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement paste*. In: Cement and Concrete Research 30 (2000) 6, S. 855-863
- [Tom 83] Tomita, R.; Takeda, K.; Kikikoro, T.: *Drying shrinkage of concrete using cement shrinkage reducing agent*. In: Review of the General Meeting / Cement Association of Japan , CAJ. – 37 (1983), S. 198-199
- [Tom 86] Tomita, R.; Simoyama, Y.; Inoue, K.: *Properties of Hardened Concrete impregnated with cement shrinkage reducing agent*. In: CAJ: Review of the General Meeting / Cement Association of Japan CAJ. – 40 (1986), S. 314 - 317
- [Übe 76] Übelhack, H.J.; Wittmann, F.H.: *Coupling of colloidal particles and recoilless fraction*. In: Le Journal de physique 37 (1976) C6, C6-273-276
- [Vid 05] Videla, C.; Aguilar, C.: *Effectiveness of shrinkage-reducing admixtures on Portland puzzolan cement concrete*. In: Materiales de Construcción 55 (2005) 278, S. 13-28

- [Web 07] Weber, R.: *Guter Beton : Ratschläge für die richtige Betonherstellung*. - 22., überarb. Aufl. - Düsseldorf : Verl. Bau und Technik, 2007. - ISBN 978-3-7640-0496-5
- [Web 96] Weber, S.: *Nachbehandlungsunempfindlicher Hochleistungsbeton*. – Stuttgart : IWB, 1996
- [Wei 00] Weiss, W.J.; Schießl, A.; Yang, W.; Shah, S.P.: *Shrinkage cracking potential, permeability, and strength for HPC*. In: International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes: Volume 1; Sherbrooke '98 / Aitcin, Pierre-Claude Delagrave, Yves (Hrsg.). - Sherbrooke : Univ. of Sherbrooke, 1998
- [Wei 03] Weiss, J.: *Experimental Determination of the "Time Zero" t_0 (Maturity-Zero M_0)*. In: Early Age Cracking in Cementitious Systems / Bentur, A. (ed.).- Baneux: RILEM Publ., 2003 (RILEM Report 25 of TC 181-EAS), S. 195-206
- [Wei 98] Weiss, W.J.; Yang, W.; Shah, S.P.: *Shrinkage cracking of restrained concrete slabs*. In: Journal of engineering mechanics 124 (1998) 7, S. 765-774
- [Wei 99] Weiss, W.J.; Borichevsky, B.B.; Shah, S.P.: *The influence of a shrinkage reducing admixture on the early-age shrinkage behavior of high performance concrete*. In: 5th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete: Proceedings / Holand, Ivar Sellevold, Erik J. (Hrsg.). - Oslo : Norwegian Concrete Association, 1999, S. 1339-1350
- [Wit 75] Wittmann, F.H.: *Zur Ursache der sogenannten Schrumpfrisse*. In: Zement und Beton (1975) 85/86, S. 10-16
- [Wit 77] Wittmann, F.H.: *Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften des Betons*. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1977) 290, S. 43-101
- [Wit 99] Wittmann, F.H.; Trausch, L.: *Hygro-mechanisches Verhalten von zementgebundenen Werkstoffen*. – Zürich, 1999
- [Yam 04] Yamada, K.; Nakanishi, H.; Tamaki, S.; Yacuchi, M.; Okazawa, S.: *Action Mechanism of a Shrinkage-reducing Superplasticizer of New Generation*. In: Taiheiyo Cement Corporation: Journal of Research (2004) 146, S. 3-10

8.2 Normen und Regelwerke

Norm DIN EN 196-1 2005-05. *Prüfverfahren für Zement : Teil 1: Bestimmung der Festigkeit ; Deutsche Fassung EN 196-2:2005*

Norm DIN EN 196-1 2005-05. *Prüfverfahren für Zement : Teil 2: Chemische Analyse von Zement ; Deutsche Fassung EN 196-2:2005*

Norm DIN EN 196-3 2005-05. *Prüfverfahren für Zement : Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit ; Deutsche Fassung EN 196-3:2005.*

Norm DIN EN 413-2 2005-08. *Putz- und Mauerbinder : Teil 2: Prüfverfahren ; Deutsche Fassung EN 413-2:2005.*

Norm DIN EN 459-2 2002-02. *Baukalk : Teil 2 : Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 459-2:2001.*

Norm DIN EN 12350-2 2000-03. *Prüfung von Frischbeton : Teil 2: Setzmaß ; Deutsche Fassung EN 12350-2:1999.*

Norm DIN EN 12350-5 2000-06. *Prüfung von Frischbeton : Teil 5: Ausbreitmaß ; Deutsche Fassung EN 12350-5:1999.*

Norm DIN EN 12350-6 2000-03. *Prüfung von Frischbeton : Teil 6: Frischbetonrohddichte ; Deutsche Fassung EN 12350-6:1999.*

Norm DIN EN 12350-7 2000-11. *Prüfung von Frischbeton : Teil 7: Luftgehalte - Druckverfahren ; Deutsche Fassung EN 12350-7:2000.*

Norm DIN EN 12390-2 2001-06. *Prüfung von Festbeton : Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen ; Deutsche Fassung EN 12390-2:2000.*

Norm DIN EN 14210 2004-03. *Bestimmung der Grenzflächenspannung von grenzflächenaktiven Lösungen mittels Bügel- oder Ringverfahren : Grenzflächenaktive Stoffe ; Deutsche Fassung EN 14210:2003.*

Norm DIN 1045-1 2001-07. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton : Teil 1: Bemessung und Konstruktion.*

Norm DIN 1045-2 / 2007-01. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton : Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität ; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*

Norm DIN 4227-1/A1 1995-12. *Spannbeton : Teil 1: Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung Änderung A1.*

Norm DIN 50014 1985. *Normalklimate : Klimate und ihre technische Anwendung.*

Norm DIN 52450 1985-08. *Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern : Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe.*

Norm DIN 50008-1 1981-02. *Konstantklimate über wäßrigen Lösungen : Teil 1: Gesättigte Salzlösungen - Glycerinlösungen ; Klimate und ihre technische Anwendung.*

Norm DIN 66133 1993-06. *Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion.*

Norm STM C 157/C 157M:2006 *Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*

9 Anhang A – Tabellen

Tabelle A-1 Chemische Analysedaten und Phasenzusammensetzung der verwendeten Zemente in M.-%

Parameter	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R-HS	CEM II/A-LL 42,5 R	CEM III/A 42,5 N
	CEM I	CEM I-HS	CEM II	CEM III
1	2	3	4	5
SiO ₂	20,3	20,6	19,8	26,65
Al ₂ O ₃	5,50	3,68	3,78	8,16
TiO ₂	0,26	0,20	0,20	0,67
P ₂ O ₅	0,22	0,33	0,13	0,21
Fe ₂ O ₃	1,96	4,23	1,14	1,55
CaO	64,2	65,2	64,2	53,0
MgO	0,99	1,27	0,69	4,47
SO ₃	2,79	2,35	2,94	2,33
K ₂ O	0,99	0,83	0,67	0,80
Na ₂ O	0,16	0,22	0,26	0,27
Na ₂ O-Äqu.	0,79	0,77	0,70	0,80
CO ₂	1,54	0,44	5,43	0,66
H ₂ O	0,96	0,65	0,77	0,76
C ₃ S ¹⁾	63,9	75,2	-	-
C ₂ S ¹⁾	11,5	2,90	-	-
C ₃ A ¹⁾	11,5	2,62	-	-
C ₄ AF ¹⁾	6,12	13,0	-	-
Hüttensand	-	-	-	45,0
Kalkstein	-	-	17,0	-

1) glühverlustfrei, nach Bogue

-) nicht bestimmbar

Tabelle A-2 Physikalische Eigenschaften der Zemente

		Einheit	CEM I	CEM I-HS	CEM II	CEM III
1		2	3	4	5	6
Dichte		g/cm ³	3,09	3,10	3,03	2,99
Spez. Oberfläche (Blaine)		cm ² /g	3850	4450	4360	3790
Lageparameter x'		µm	17,5	16,6	18,3	19,0
Steigungsmaß n		-	0,82	0,81	0,82	0,87
Wasseranspruch		M.-%	29,0	28,5	28,5	28,5
Erstarrungsbeginn		min	160	180	150	200
Druckfestigkeit	2d	MPa	32,6	35,1	18,3	27,6
	28d	MPa	59,9	56,7	53,3	59,8

Bezeichnung ¹⁾	Wirkstoff	Wirkstoff- gehalt ²⁾	Dosiermenge Hersteller- empfehlung	Dichte	Oberflächenspannung	
					SRA bzw. W	Wasser + 4,5 M.-% v. w SRA
		M.-%	M.-% v. z (M.-% v. w)	g/cm³	mN/m	mN/m (% v. w) ³⁾
1	2	3	4	5	6	7
SRA1	2-Butylaminoethanol	~2,5-10	1,0 – 4,0 (2,4 – 9,5) ⁴⁾	1,00	36,5	50,8 (~70)
	2,2-Dimethyl-1,3-propandiol	~50-100 ⁵⁾				
SRA2	Polyoxyalkylene Alkylether Poly(Ethylenglykol ran-Propylenglykol) Monobutylether	~100	1,0 – 2,5 (2,4 – 6,0) ⁴⁾	0,99	31,1	34,6 (~48)
SRA3	Dipropylenglykol (DPG)	~50 ⁶⁾	2,1 ⁴⁾ (5,0)	0,96	28,5	36,6 (~50)
	Dipropylenglykol-tert.-butyl-ether (DPTB)	~50 ⁶⁾				
	Dipropylenglykol-di-tert.-butyl-ether	~1-10				
W1	Dipropylenglykol (DPG)	~100	-	1,02	35,2	59,4 (~82)
W2	Dipropylenglykol-tert.-butyl-ether (DPTB)	~90-95	-	0,91	27,3	34,5 (~47)

1) SRA = handelsüblicher Schwindreduzierer; W = reiner Wirkstoff

2) teilweise Herstellerangaben

3) Klammerwerte: auf Wasser (72,5 mN/m) bezogene Oberflächenspannung in % v. w von
Zugabewasser mit 4,5 M.-% v. w SRA (SRA2 = 3,5 M.-% v. w)

4) Dosiermengen: SRA1, SRA2: bezogen auf Zugabewasser; SRA3: bezogen auf Zement, w/z = 0,42

5) Wirkstoff mit Gaschromatographie qualitativ nachgewiesen

6) Wirkstoff mit Gaschromatographie quantitativ nachgewiesen

*Tabelle A-3 Zusammensetzung der verwendeten handelsüblichen Schwindreduzierer und
Wirkstoffe sowie Dichte, Oberflächenspannung und empfohlene Dosierung*

Tabelle A-4 Setzfließmaß von Zementleim mit Portlandzement CEM I in Abhängigkeit vom Wasserzementwert und vom verwendeten Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff

w/z	Setzfließmaß in mm					
	Referenz ohne SRA	SRA1	SRA2	SRA3	W1	W2
1	2	3	4	5	6	7
0,25 ¹⁾	205	196	n. b.	174	185	193
0,42	158	171	179	165	164	157
0,50	131	153	n. b.	108	104	112

1) Fließmitteldosierung: 0,58 M.-% v. z

n. b. nicht bestimmt

Tabelle A-5 Setzfließmaß von Zementleim mit einem Wasserzementwert von w/z = 0,42, den Zementen CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II, CEM III sowie Schwindreduzierer SRA3 und den Wirkstoffen W1 und W2

Zementleim	Setzfließmaß in mm			
	Referenz o. SRA	SRA3	W1	W2
1	2	3	4	5
CEM I	158	165	164	157
CEM Ia	179	122	118	119
CEM I-HS	196	205	206	204
CEM II	143	159	170	177
CEM III	229	216	190	193

Tabelle A-6 Setzfließmaß von Zementleim mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,25$, den Zementen CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II, CEM III sowie den Wirkstoffen W1 und W2

Zementleim mit:	FM ¹⁾ M.-% v. z	Setzfließmaß in mm		
		Referenz o. SRA	W1	W2
1	2	3	4	5
CEM I	0,58	205	185	193
CEM Ia	0,61	138	211	249
CEM I-HS	0,80	150	297	299
CEM II	0,36	172	144	204
CEM III	0,36	180	160	197

1) Fließmitteldosierung

Tabelle A-7 Einfluss des Wasserzementwerts und der Schwindreduzierer bzw. Wirkstoffe auf den Luftgehalt der Zementleime mit Portlandzement CEM I

w/z	Luftgehalt in Vol.-%					
	Referenz o. SRA	SRA1	SRA2	SRA3	W1	W2
1	2	3	4	5	6	7
0,25	1,2	1,3	n. b.	1,8	n. b.	n. b.
0,42	0,4	0,8	0,4	0,3	0,3	0,0
0,50	0,1	0,1	n. b.	0,1	n. b.	n. b.

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A-8 Luftgehalt verschiedener Zementleime mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,42$ sowie den Schwindreduzierer SRA3 und den Wirkstoffen W1 und W2

Zementleim mit:	Luftgehalt in Vol.-%			
	Referenz ohne SRA	SRA3	W1	W2
1	2	3	4	5
CEM I	0,4	0,3	0,3	0,0
CEM Ia	0,1	0,1	1,4	0,2
CEM I-HS	0,4	0,0	0,2	0,0
CEM II	0,2	0,2	n. b.	n. b.
CEM III	0,4	0,0	0,2	0,0

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A-9 Reduzierung des autogenen Schwindens von Portlandzementstein CEM I im Alter von 182 Tagen bezogen auf die Referenz ohne Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff; Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA bzw. W)

w/z	Schwindreduzierung in %				
	SRA1	SRA2	SRA3	W1	W2
1	2	3	4	5	6
0,25	27	n. b.	41	41	50
0,42	19	28	45	44	42
0,50	n. b.	n. b.	n. b.	10	32

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A-10 Reduzierung des autogenen Schwindens von Zementstein CEM Ia durch SRA3, W1 und W2 im Alter von 182 Tagen bezogen auf die Referenz ohne Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff; Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA bzw. W)

w/z	Schwindreduzierung in %		
	SRA3	W1	W2
1	2	3	4
0,25	n. b.	14	51
0,42	39	41	46

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A-11 Reduzierung des autogenen Schwindens von Portlandzementstein CEM I-HS im Alter von 182 Tagen bezogen auf die Referenz ohne Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff; Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA bzw. W)

w/z	Schwindreduzierung in %		
	SRA3	W1	W2
1	2	3	4
0,25	n. b.	-6	50
0,42	36	1	28

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A-12 Reduzierung des autogenen Schwindens von Portlandkalksteinzementstein CEM II im Alter von 182 Tagen bezogen auf die Referenz ohne Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff; Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA bzw. W)

w/z	Schwindreduzierung in %		
	SRA3	W1	W2
1	2	3	4
0,25	n. b.	-7	77
0,42	40	7	31

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A-13 Reduzierung des autogenen Schwindens von Hochofenzementstein CEM III im Alter von 182 Tagen bezogen auf die Referenz ohne Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff; Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA bzw. W)

w/z	Schwindreduzierung in %		
	SRA3	W1	W2
1	2	3	4
0,25	n. b.	-12	59
0,42	44	-26	51

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A-14 Reduzierung des autogenen Schwindens von Zementstein im Alter von 182 Tagen bezogen auf die Referenz ohne Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff; mit w/z = 0,42, Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA bzw. W)

Zementstein	Schwindreduzierung in %		
	SRA3	W1	W2
1	2	3	4
CEM I	45	44	42
CEM Ia	39	41	46
CEM I-HS	36	1	28
CEM III	44	-26	51
CEM II	40	7	31

Tabelle A-15 Reduzierung des autogenen Schwindens von Zementstein im Alter von 182 Tagen bezogen auf die Referenz ohne Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff; mit w/z = 0,25, Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA bzw. W)

w/z	Schwindreduzierung in %		
	SRA3	W1	W2
1	2	3	4
CEM I	41	41	50
CEM Ia	n. b.	14	51
CEM I-HS	n. b.	-6	50
CEM II	n. b.	-7	77
CEM III	n. b.	-12	59

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A-16 Relative Feuchte über gesättigten Salzlösungen bzw. Silicagel bei 20 °C

Name	Chemische Bezeichnung	Rel. Luftfeuchte bei 20 °C in %
1	2	3
Silicagel mit Orange-indikator	SiO ₂	~ 0
Kaliumacetat	CH ₃ COOK	23
Kaliumcarbonat	K ₂ CO ₃ ·2H ₂ O	44
Natriumnitrit	NaNO ₂	66
Kaliumchlorid	KCl	86

Tabelle A-17: Porenradien im Zementstein zum Zeitpunkt (t)

Zement	Wasserzementwert	Bezeichnung	Alter	Relative Feuchte	Oberflächenspannung	Sättigungsradius		maximale Kapillarspannung	Porenvolumen bis zum Sättigungsradius	Gesamtporenvolumen	Wirksamer Porenanteil	Kapillarspannung im wirksamen Porenanteil	Relative Kapillarspannung bezogen auf die Referenz	Schwindreduzierung
														SR [%]
z	w/z	Bez.	t	r. F.	γ	r(t)		$\sigma_{\text{kap}}(r(t))$	$V_{P,r(t)}$	$V_{P,\text{ges}}$	$V_{P,\text{wirk}}$	$\sigma_{\text{kap}}(V_{P,\text{wirk}})$	rel. $\sigma_{\text{kap}}(V_{P,\text{wirk}})$	
-	-	-	[d]	[%]	[N/m]	[m]	[nm]	[MPa]	[mm ³ /g]	[mm ³ /g]	%	[MPa]	[%]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CEM I	0,25	Referenz	1	90,4	0,071	1,04E-08	10,4	13,65	57,16	113,31	50,4%	6,88		
			2	87,5	0,071	7,86E-09	7,9	18,05	67,41	103,87	64,9%	11,71		
			7	81,1	0,071	5,03E-09	5,0	28,34	70,21	97,14	72,3%	20,48		
			14	81,2	0,071	5,07E-09	5,1	28,11	68,34	95,99	71,2%	20,01		
			28	80,8	0,071	4,89E-09	4,9	28,88	57,51	79,44	72,4%	20,91		
			56	80,8	0,073	5,02E-09	5,0	28,88	49,07	67,38	72,8%	21,03		
			91	80,8	0,073	5,02E-09	5,0	28,88	47,02	64,75	72,6%	20,97		

z	w/z	Bez.	t	r. F.	γ	r(t)		$\sigma_{\text{kap}}(r(t))$	$V_{P,r(t)}$	$V_{P,\text{ges}}$	$V_{P,\text{wirk}}$	$\sigma_{\text{kap}}(V_{P,\text{wirk}})$	rel. $\sigma_{\text{kap}}(V_{P,\text{wirk}})$	SR [%]
-	-	-	[d]	[%]	[N/m]	[m]	[nm]	[MPa]	[mm ³ /g]	[mm ³ /g]	%	[MPa]	[%]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CEM I	0,25	W1	1	91,5	0,056	1,52E-08	15,2	7,39	10,99	103,36	10,6%	0,79	88,59	53,77
			2	89,7	0,056	1,23E-08	12,3	9,02	11,77	83,98	14,0%	1,26	89,20	60,98
			7	86,7	0,054	1,02E-08	10,2	10,51	14,05	83,98	16,7%	1,76	91,41	54,43
			14	86,7	0,051	1,00E-08	10,0	10,17	10,38	68,04	15,3%	1,55	92,25	50,25
			28	87,2	0,051	1,07E-08	10,7	9,46	12,38	65,97	18,8%	1,78	91,51	45,88
			56	87,1	0,050	1,05E-08	10,5	9,52	8,89	56,06	15,9%	1,51	92,82	41,50
			91	87,1	0,050	1,05E-08	10,5	9,50	9,68	57,26	16,9%	1,61	92,34	43,28
		W2	1	98,0	0,030	4,47E-08	44,7	1,35	6,89	110,76	6,2%	0,08	98,78	71,59
			2	98,0	0,030	4,31E-08	43,1	1,40	5,29	101,01	5,2%	0,07	99,38	84,23
			7	96,1	0,030	2,25E-08	22,5	2,66	8,18	92,33	8,9%	0,24	98,85	55,71
			14	95,7	0,030	1,91E-08	19,1	3,15	9,67	85,15	11,4%	0,36	98,22	53,81
			28	94,8	0,030	1,46E-08	14,6	4,07	9,61	72,52	13,3%	0,54	97,42	51,99
			56	94,4	0,030	1,29E-08	12,9	4,60	9,53	64,31	14,8%	0,68	96,76	49,43
			91	94,1	0,031	1,23E-08	12,3	5,07	11,13	62	18,0%	0,91	95,66	50,58

z	w/z	Bez.	t	r. F.	γ	r(t)		$\sigma_{\text{kap}}(r(t))$	$V_{P,r(t)}$	$V_{P,\text{ges}}$	$V_{P,\text{wirk}}$	$\sigma_{\text{kap}}(V_{P,\text{wirk}})$	rel. $\sigma_{\text{kap}}(V_{P,\text{wirk}})$	SR [%]
-	-	-	[d]	[%]	[N/m]	[m]	[nm]	[MPa]	[mm ³ /g]	[mm ³ /g]	%	[MPa]	[%]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CEM I	0,42	Referenz	2	98,5	0,071	6,73E-08	67,3	2,11	7,4	151,5	4,9%	0,10		
			7	95,8	0,071	2,46E-08	24,6	5,81	11,1	113,7	9,7%	0,56		
			14	94,4	0,071	1,83E-08	18,3	7,79	10,5	95,6	10,9%	0,85		
			28	94,1	0,071	1,73E-08	17,3	8,18	14,5	91,5	15,8%	1,29		
			56	94,1	0,072	1,74E-08	17,4	8,21	11,6	74,3	15,6%	1,28		
			91	94,1	0,073	1,76E-08	17,6	8,23	12,5	78,9	15,9%	1,30		
		SRA1	2	99,4	0,046	1,61E-07	161,0	0,57	1,1	128,7	0,8%	0,00	95,4	47,6
			7	99,0	0,043	1,03E-07	103,1	0,83	1,0	92,2	1,1%	0,01	98,4	50,3
			14	98,6	0,042	7,66E-08	76,6	1,10	n. b.					61,9
			28	98,6	0,041	7,33E-08	73,3	1,12	1,8	78,7	2,3%	0,03	98,0	35,9
			56	98,5	0,042	7,28E-08	72,8	1,15	n. b.					29,9
			91	98,5	0,043	7,47E-08	74,7	1,16	6,6	78,0	8,4%	0,10	92,5	24,7

z	w/z	Bez.	t	r. F.	γ	r(t)		$\sigma_{\text{kap}}(r(t))$	$V_{P,r(t)}$	$V_{P,\text{ges}}$	$V_{P,\text{wirk}}$	$\sigma_{\text{kap}}(V_{P,\text{wirk}})$	rel. $\sigma_{\text{kap}}(V_{P,\text{wirk}})$	SR [%]
-	-	-	[d]	[%]	[N/m]	[m]	[nm]	[MPa]	[mm ³ /g]	[mm ³ /g]	%	[MPa]	[%]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CEM I	0,42	SRA3	2	100,0	0,033	6,80E-05	68032	0,00	0,0	164,1	0,0%	0,00	100,0	42,3
			7	99,3	0,032	1,40E-07	140,1	0,45	4,6	109,4	4,2%	0,02	96,6	54,3
			14	99,0	0,031	9,71E-08	97,1	0,63	n. b.					50,7
			28	98,9	0,030	9,36E-08	93,6	0,64	5,7	85,3	6,7%	0,04	96,7	46,6
			56	98,8	0,030	8,71E-08	87,1	0,68	n. b.					46,2
			91	98,7	0,029	8,21E-08	82,1	0,71	5,3	69,1	7,6%	0,05	95,8	44,2
		W1	2	98,6	0,056	9,46E-08	94,6	1,17	4,4	166,8	2,6%	0,03	70,0	23,8
			7	98,3	0,054	8,47E-08	84,7	1,26	6,7	104,2	6,4%	0,08	85,6	52,9
			14	97,0	0,051	4,79E-08	47,9	2,13	6,8	104,4	6,5%	0,14	83,8	50,0
			28	95,6	0,051	3,24E-08	32,4	3,13	7,9	86,6	9,2%	0,29	77,9	43,1
			56	95,3	0,050	3,00E-08	30,0	3,35	n. b.					42,6
			91	95,3	0,050	2,98E-08	29,8	3,34	6,6	68,5	9,6%	0,32	75,5	42,1
		W2	2	99,9	0,030	6,87E-07	687,3	0,09	3,1	178,0	1,8%	0,00	98,5	68,5
			7	99,4	0,030	1,38E-07	137,8	0,44	3,2	117,7	2,7%	0,01	97,9	46,3
			14	98,3	0,030	4,94E-08	49,4	1,22	3,3	99,5	3,3%	0,04	95,3	58,8
			28	98,4	0,030	4,77E-08	47,7	1,25	4,1	87,1	4,7%	0,06	95,5	45,0
			56	98,4	0,030	4,56E-08	45,6	1,32	n. b.					44,3
			91	98,4	0,031	4,55E-08	45,5	1,38	6,6	85,2	7,8%	0,11	91,8	43,6

z	w/z	Bez.	t	r. F.	γ	r(t)		$\sigma_{\text{kap}}(r(t))$	$V_{P,r(t)}$	$V_{P,\text{ges}}$	$V_{P,\text{wirk}}$	$\sigma_{\text{kap}}(V_{P,\text{wirk}})$	rel. $\sigma_{\text{kap}}(V_{P,\text{wirk}})$	SR [%]
-	-	-	[d]	[%]	[N/m]	[m]	[nm]	[MPa]	[mm ³ /g]	[mm ³ /g]	%	[MPa]	[%]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CEM Ia	0,42	Referenz	2	97,2	0,073	3,78E-08	37,8	3,84	56,4	197,2	28,6%	1,10		
			7	91,6	0,072	1,21E-08	12,1	11,93	92,9	148,3	62,7%	7,48		
			14	90,0	0,073	1,02E-08	10,2	14,22	86,0	135,3	63,6%	9,04		
			28	90,1	0,073	1,03E-08	10,3	14,10	74,0	126,7	58,4%	8,24		
			56	90,1	0,073	1,03E-08	10,3	14,10	60,3	118,1	51,0%	7,20		
			91	90,1	0,071	1,01E-08	10,1	14,10	47,4	108,1	43,8%	6,18		
		SRA3	2	98,4	0,031	5,53E-08	55,3	1,12	6,1	166,1	3,6%	0,04	96,3	50,1
			7	97,5	0,030	3,72E-08	37,2	1,61	6,6	132,6	5,0%	0,08	98,9	43,6
			14	97,1	0,030	3,31E-08	33,1	1,80	6,6	117,8	5,6%	0,10	98,9	43,8
			28	97,1	0,030	3,39E-08	33,9	1,76	9,2	112,4	8,1%	0,14	98,3	43,4
			56	97,1	0,030	3,35E-08	33,5	1,78	8,0	100,6	7,9%	0,14	98,0	41,1
			91	97,1	0,030	3,28E-08	32,8	1,81	7,3	92,5	7,9%	0,14	97,7	40,0

Fortsetzung Tabelle A-17

z	w/z	Bez.	t	r. F.	γ	r(t)		$\sigma_{\text{kap}}(r(t))$	$V_{P,r(t)}$	$V_{P,\text{ges}}$	$V_{P,\text{wirk}}$	$\sigma_{\text{kap}}(V_{P,\text{wirk}})$	rel. $\sigma_{\text{kap}}(V_{P,\text{wirk}})$	SR [%]
-	-	-	[d]	[%]	[N/m]	[m]	[nm]	[MPa]	[mm ³ /g]	[mm ³ /g]	%	[MPa]	[%]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CEM I- HS	0,42	Referenz	2	99,9	0,074	9,70E-07	970,4	0,15	2,2	189,0	1,2%	0,0018		
			7	98,6	0,073	7,91E-08	79,1	1,85	4,2	135,5	3,1%	0,06		
			14	95,9	0,073	2,57E-08	25,7	5,66	9,2	120,9	7,6%	0,43		
			28	94,5	0,073	1,89E-08	18,9	7,71	10,3	95,3	10,8%	0,83		
			56	93,2	0,073	1,53E-08	15,3	9,49	12,4	77,3	16,1%	1,53		
			91	92,4	0,073	1,37E-08	13,7	10,66	16,9	78,1	21,6%	2,30		
		SRA3	2	99,1	0,033	1,03E-07	103,3	0,63	3,3	169,2	1,9%	0,01	-597	53,0
			7	99,1	0,031	1,18E-07	118,5	0,52	1,2	100,4	1,2%	0,01	89,0	51,5
			14	98,9	0,030	1,02E-07	101,7	0,59	1,9	89,9	2,1%	0,01	97,1	42,2
			28	98,6	0,030	7,80E-08	78,0	0,77	3,8	83,7	4,6%	0,04	95,8	44,4
			56	98,0	0,030	5,20E-08	52,0	1,15	4,9	76,6	6,4%	0,07	95,2	45,2
			91	97,4	0,030	4,05E-08	40,5	1,47	5,9	73,5	8,1%	0,12	94,9	41,9

z	w/z	Bez.	t	r. F.	γ	r(t)		$\sigma_{\text{kap}}(r(t))$	$V_{P,r(t)}$	$V_{P,\text{ges}}$	$V_{P,\text{wirk}}$	$\sigma_{\text{kap}}(V_{P,\text{wirk}})$	rel. $\sigma_{\text{kap}}(V_{P,\text{wirk}})$	SR [%]
-	-	-	[d]	[%]	[N/m]	[m]	[nm]	[MPa]	[mm ³ /g]	[mm ³ /g]	%	[MPa]	[%]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CEM III	0,42	Referenz	2	99,5	0,072	2,13E-07	212,8	0,68	5,3	223,2	2,4%	0,0162		
			7	97,0	0,073	3,54E-08	35,4	4,11	6,1	142,6	4,3%	0,18		
			14	94,6	0,073	1,95E-08	19,5	7,44	13,1	124,1	10,6%	0,79		
			28	91,6	0,073	1,22E-08	12,2	11,93	18,4	102,5	18,0%	2,15		
			56	89,3	0,073	9,46E-09	9,5	15,33	23,8	79,3	30,0%	4,60		
			91	89,2	0,072	9,30E-09	9,3	15,51	24,8	74,7	33,2%	5,15		
		SRA3	2	100,0	0,035	9,73E-06	9732,1	0,01	4,1	219,1	1,8%	0,00	99,2	33,5
			7	99,9	0,033	1,79E-06	1785,3	0,04	1,7	136,9	1,3%	0,00	99,7	0,3
			14	99,6	0,032	2,59E-07	259,0	0,25	1,7	105,1	1,6%	0,00	99,5	17,1
			28	97,8	0,032	4,90E-08	49,0	1,29	3,2	81,0	3,9%	0,05	97,6	32,5
			56	95,9	0,031	2,55E-08	25,5	2,43	4,8	83,0	5,8%	0,14	96,9	40,4
			91	95,6	0,030	2,36E-08	23,6	2,56	5,1	68,6	7,4%	0,19	96,3	41,8

Fortsetzung Tabelle A-17

z	w/z	Bez.	t	r. F.	γ	r(t)		$\sigma_{\text{kap}}(r(t))$	$V_{P,r(t)}$	$V_{P,\text{ges}}$	$V_{P,\text{wirk}}$	$\sigma_{\text{kap}}(V_{P,\text{wirk}})$	rel. $\sigma_{\text{kap}}(V_{P,\text{wirk}})$	SR [%]
-	-	-	[d]	[%]	[N/m]	[m]	[nm]	[MPa]	[mm ³ /g]	[mm ³ /g]	%	[MPa]	[%]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CEM II	0,42	Referenz	2	99,4	0,066	1,68E-07	167,9	0,78	5,8	164,0	3,5%	0,0275		
			7	97,2	0,068	3,54E-08	35,4	3,85	12,8	124,5	10,3%	0,39		
			14	96,0	0,070	2,50E-08	25,0	5,59	14,2	106,6	13,3%	0,75		
			28	95,7	0,071	2,37E-08	23,7	5,97	19,6	107,6	18,2%	1,09		
			56	95,4	0,071	2,24E-08	22,4	6,33	18,3	102,5	17,8%	1,13		
			91	95,2	0,071	2,12E-08	21,2	6,72	22,5	98,1	22,9%	1,54		
		SRA3	2	99,7	0,033	3,04E-07	304,0	0,22	2,3	155,3	1,5%	0,00	88,4	72,3
			7	99,6	0,032	2,97E-07	297,4	0,21	1,2	125,1	0,9%	0,00	99,5	56,4
			14	99,4	0,031	1,73E-07	173,0	0,36	1,3	107,5	1,2%	0,00	99,4	52,4
			28	99,2	0,030	1,38E-07	137,9	0,44	3,3	107,8	3,1%	0,01	98,8	47,3
			56	99,2	0,030	1,34E-07	134,2	0,44	3,0	102,8	2,9%	0,01	98,9	44,8
			91	99,2	0,029	1,21E-07	121,0	0,48	3,2	96,2	3,4%	0,02	98,9	43,4

Tabelle A-18

Einfluss der Wirkstoffe W1 und W2 auf die wesentlichen untersuchten Eigenschaften von Zugabewasser, Porenlösung, Zementleim, Zementstein und Mörtel in Abhängigkeit des Zements und des Wasserzementwertes

	Eigenschaft	w/z	Wirkstoff W1					Wirkstoff W2				
			Zementstein					Zementstein				
			CEM I	CEM Ia	CEM I-HS	CEM II	CEM III	CEM I	CEM Ia	CEM I-HS	CEM II	CEM III
1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Zugabe- Wasser	Hydrophobe Wechselwirkung	-	+					++				
	Oberflächenspannung	-	-					--				
Zement- leim	Konsistenz	0,42	O					O				
		0,25	O	+	+	O	O	O	+	+	O	O
	Luftgehalt	0,42	O	+	O	O	O	O				
Poren- lösung	Hvdrophobe Wechselwirkung	0,42	+					++				
	Oberflächenspannung	0,42	-					--				
	SRA-Konzentration	0,42	+					-				
Zementstein	Gesamtporosität	0,42	O	O	O *)	O *)	O	O	+			+
		0,25	-					O				
	Gelporenanteil	0,42	++	++	++ *)	++ *)	++	+	O			++
		0,25	+					+				
	innere relative Feuchte	0,42	+	+			O		++			++
		0,25	+					++				
	wirksame Kapillarspannung	0,42	-					--				
		0,25	--					--				
	Oberflächenenergie	0,42	O					O				
		0,25	O					O				
	Spaltdruck (in Bezug auf die Re- ferenz ohne SRA)	0,42	O					++				
		0,25	O					+				
Autogenes Schwinden	0,42	--	--	O	O	+	-	--	-	-	--	
	0,25	-	O	+	+	+	-	-	-	--	-	
Mörtel	Trocknungsschwinden	0,50	O					-				

- ++ wird stark erhöht
 + wird erhöht
 O wird geringfügig oder nicht beeinflusst
 - wird verringert
 -- wird stark verringert
 *) abgeleitet aus Ergebnissen mit SRA3

10 Anhang B – Bilder

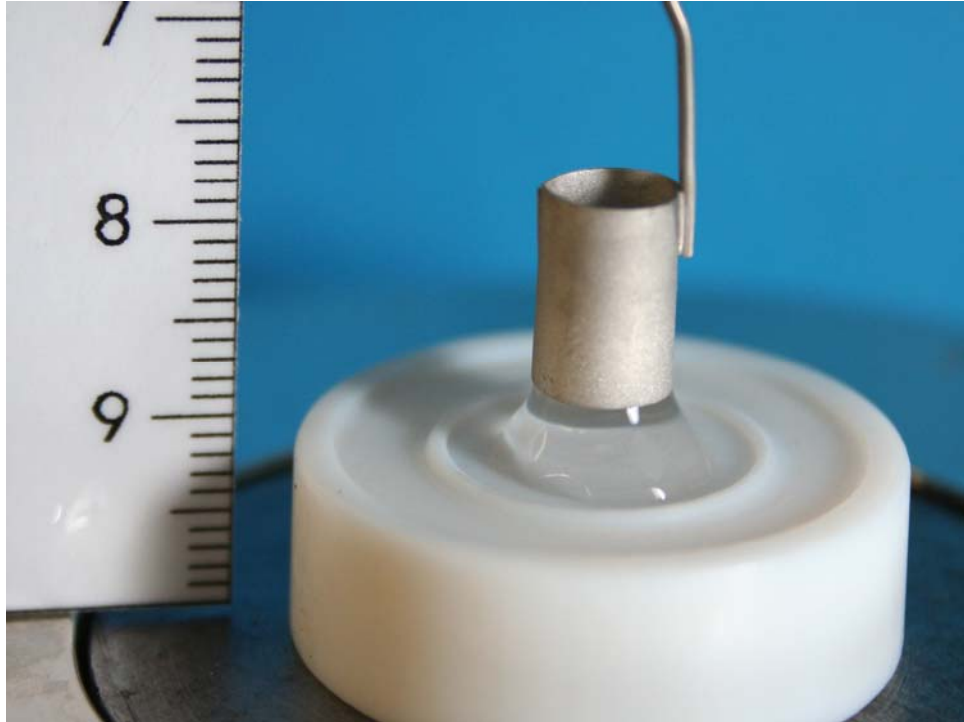


Bild B-1 Messung der Oberflächenspannung von Porenlösung mit geringem Probenvolumen in Anlehnung an die WILHELMY-Plattenmethode mit gebogener Platte



Bild B-2 Versuchsaufbau zur kontinuierlichen Bestimmung der autogenen Schwindverformung mit einem Messbeginn von rd. sechs Stunden nach Wasserzugabe

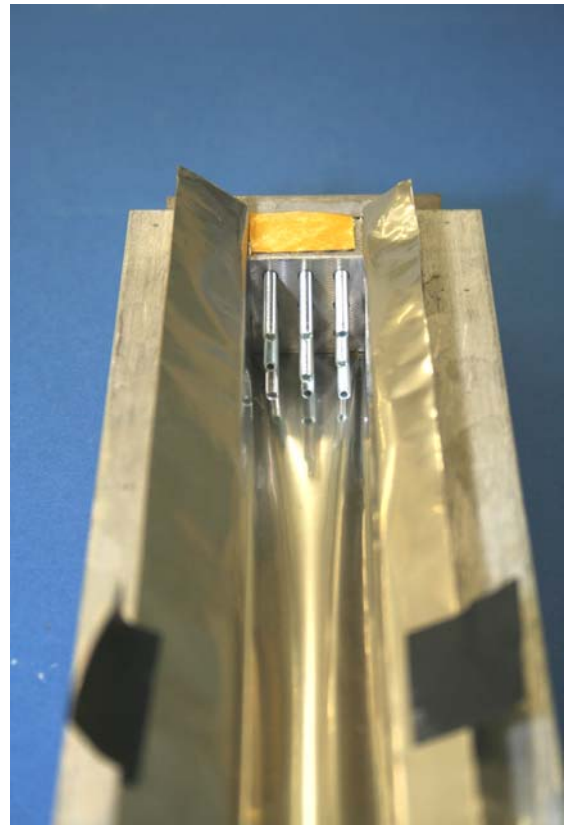
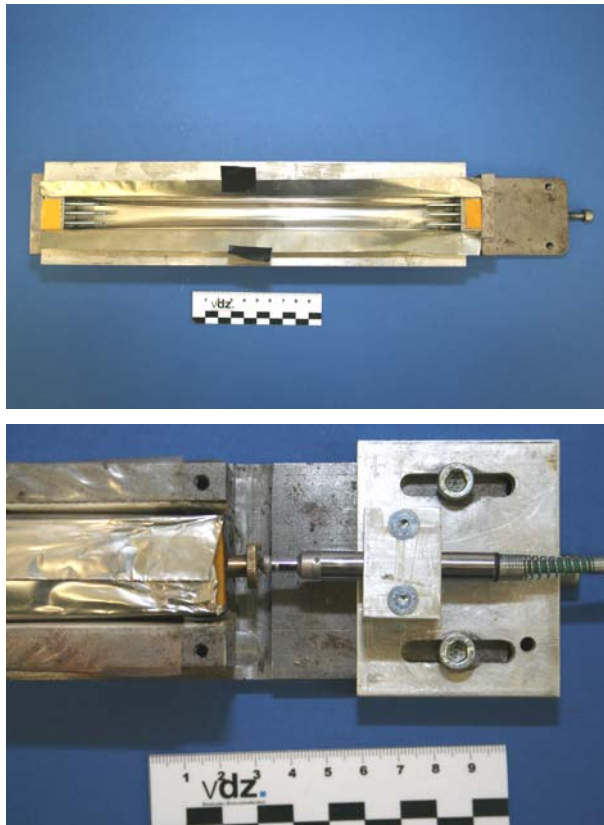
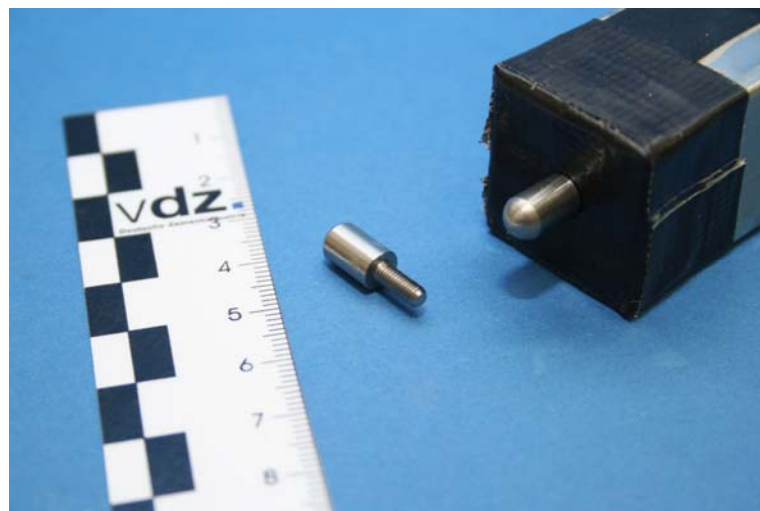


Bild B-3 Schwindform (oben links), Kopfplatte mit 9 Gewindebolzen zur Kraftübertragung des Zementsteins (rechts) und Ankopplung des Messtasters an den Probekörper (unten links)



*Bild B-4 links: Messung des autogenen Schwindens in Anlehnung an DIN 52 450 nach Ausbau aus den Versuchsständen zur kontinuierlichen Messung (s. Bild B-2 und Bild B-3)
rechts: Prisma mit eingeschraubter Messmarke nach DIN 52 450*

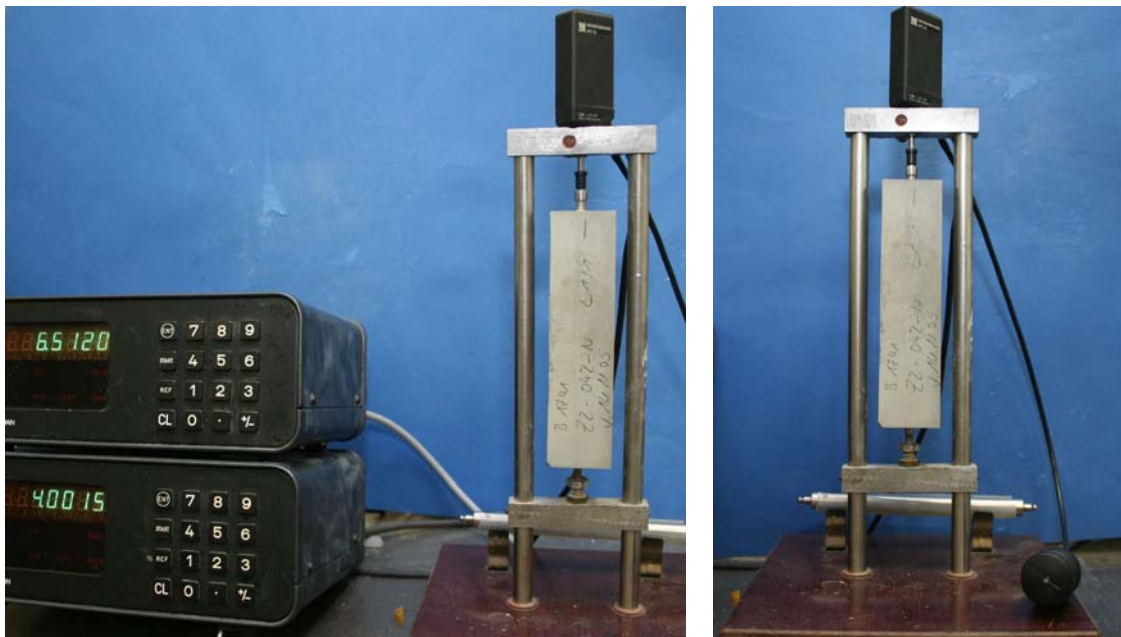


Bild B 5 Schwindmessung der Mörtel-Prismen nach Graf-Kaufmann in Anlehnung an DIN 52 450

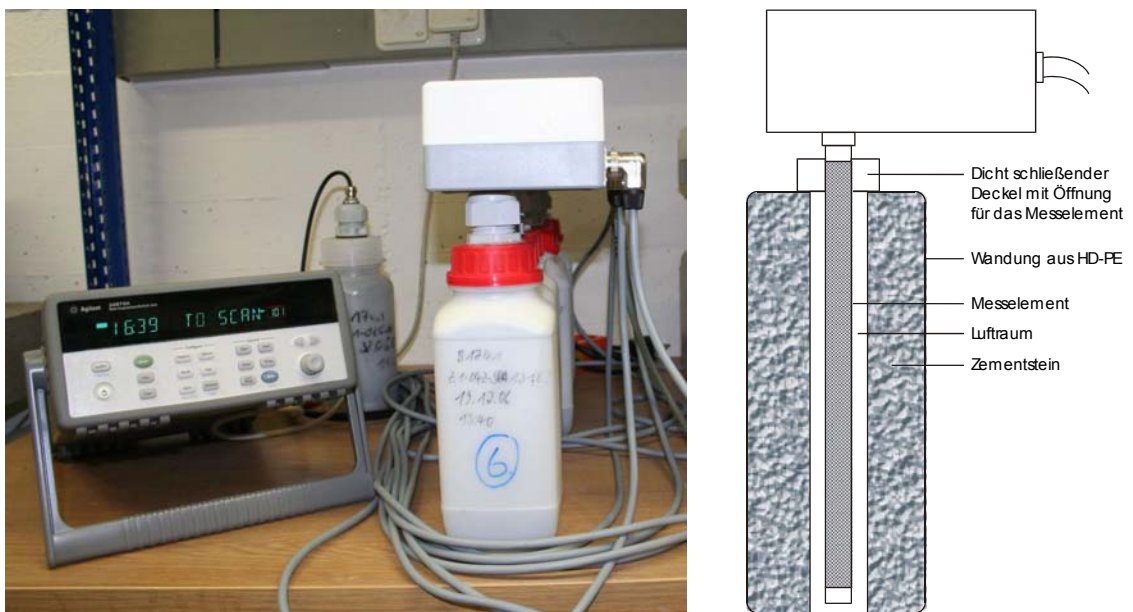


Bild B-6 Versuchsaufbau (links) und schematische Darstellung des Messsystems (rechts) zur Bestimmung der inneren relativen Luftfeuchte in Zementstein

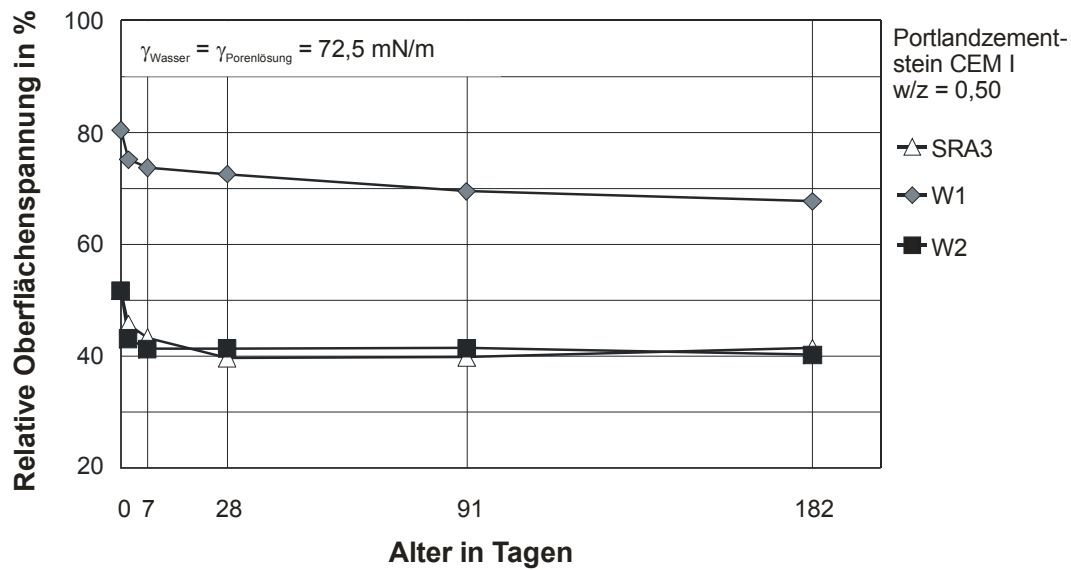


Bild B-7 Relative Oberflächenspannung der Porenlösung von Zementstein mit w/z = 0,50 mit Portlandzement CEM I sowie Schwindreduzierer SRA3 und den Wirkstoffen W1 und W2 bezogen auf die Oberflächenspannung von deionisiertem Wasser; Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA bzw. W)

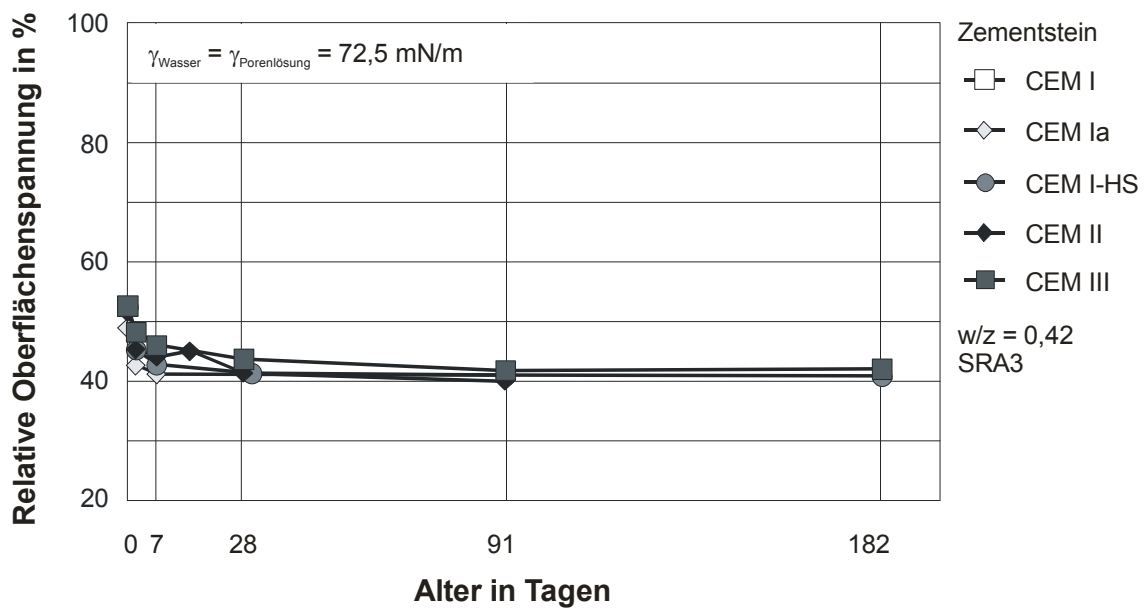


Bild B-8 Relative Oberflächenspannung der Porenlösung von Zementstein mit w/z = 0,42 mit den Zementen CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III und Schwindreduzierer SRA3 bezogen auf die Oberflächenspannung von deionisiertem Wasser; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

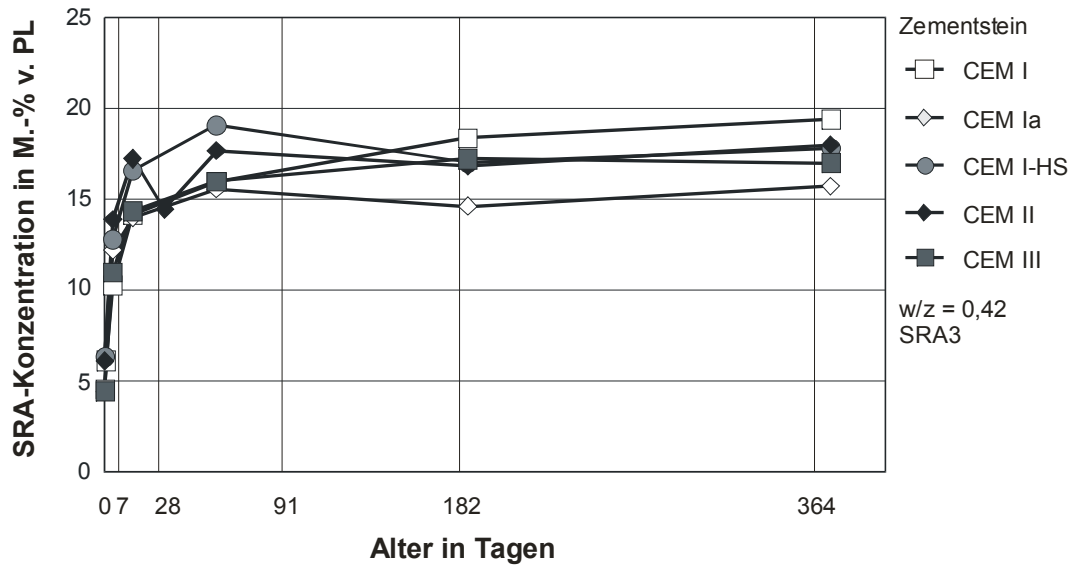


Bild B-9 SRA-Konzentration der Porenlösung von Zementstein mit w/z = 0,42 mit den Zementen CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III und Schwindreduzierer SRA3; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

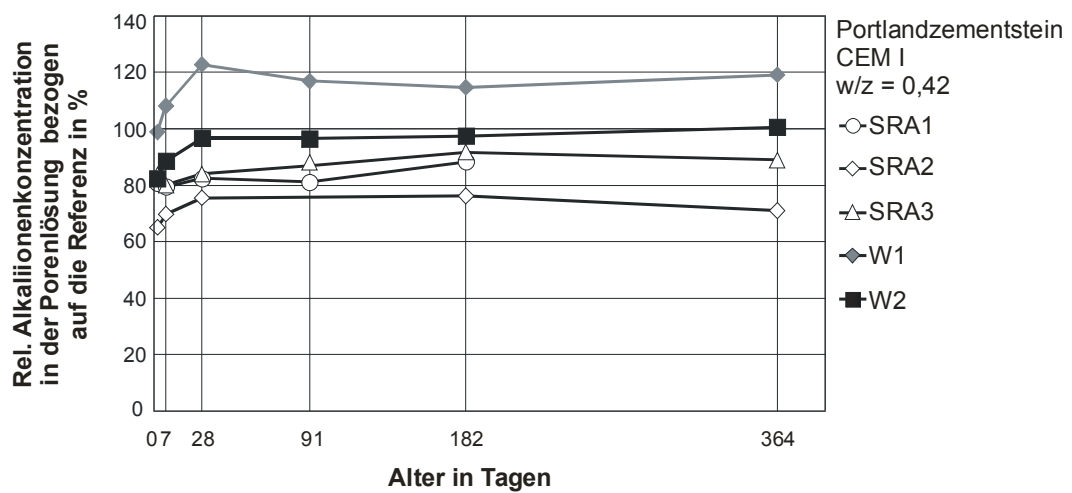


Bild B-10 Relative Alkaliionenkonzentration in der Porenlösung von Zementstein mit w/z = 0,42 und Portlandzement CEM I sowie den Schwindreduzierern SRA1, SRA2, SRA3 und den Wirkstoffen W1 und W2 bezogen auf die Alkaliionenkonzentration der Porenlösung von Zementstein ohne SRA bzw. Wirkstoff; Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA2: 3,5 M.-% v. w)

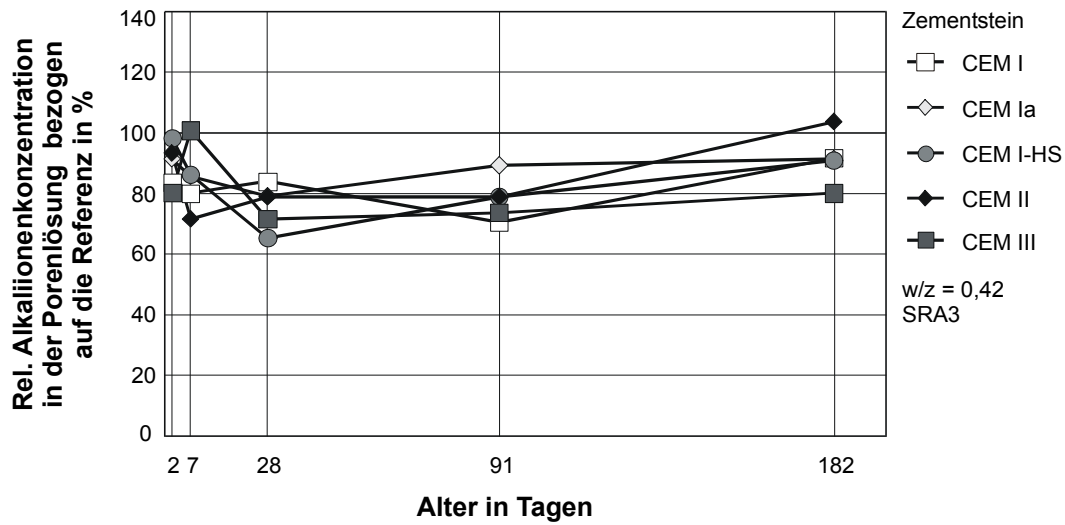


Bild B-11 Relative Alkaliionenkonzentration in der Porenlösung von Zementstein mit $w/z = 0,42$ und den Zementen CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III sowie Schwindreduzierer SRA3 bezogen auf die Alkaliionenkonzentration der Porenlösung von Zementstein ohne SRA bzw. Wirkstoff; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

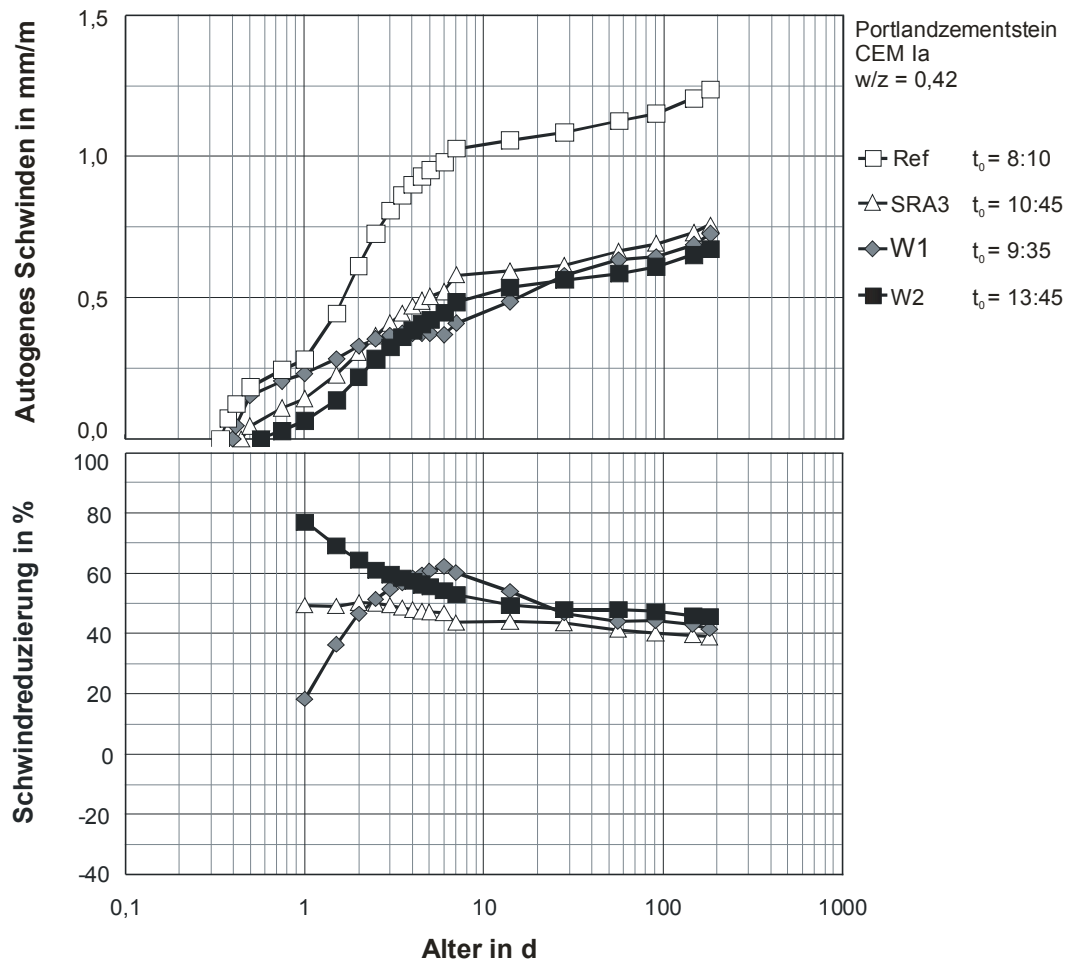


Bild B-12 Autogenes Schwinden (oben) und Schwindreduzierung (unten) von Portlandzementstein CEM Ia mit $w/z = 0,42$ und mit Schwindreduzierer SRA3 sowie den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA bzw. W)

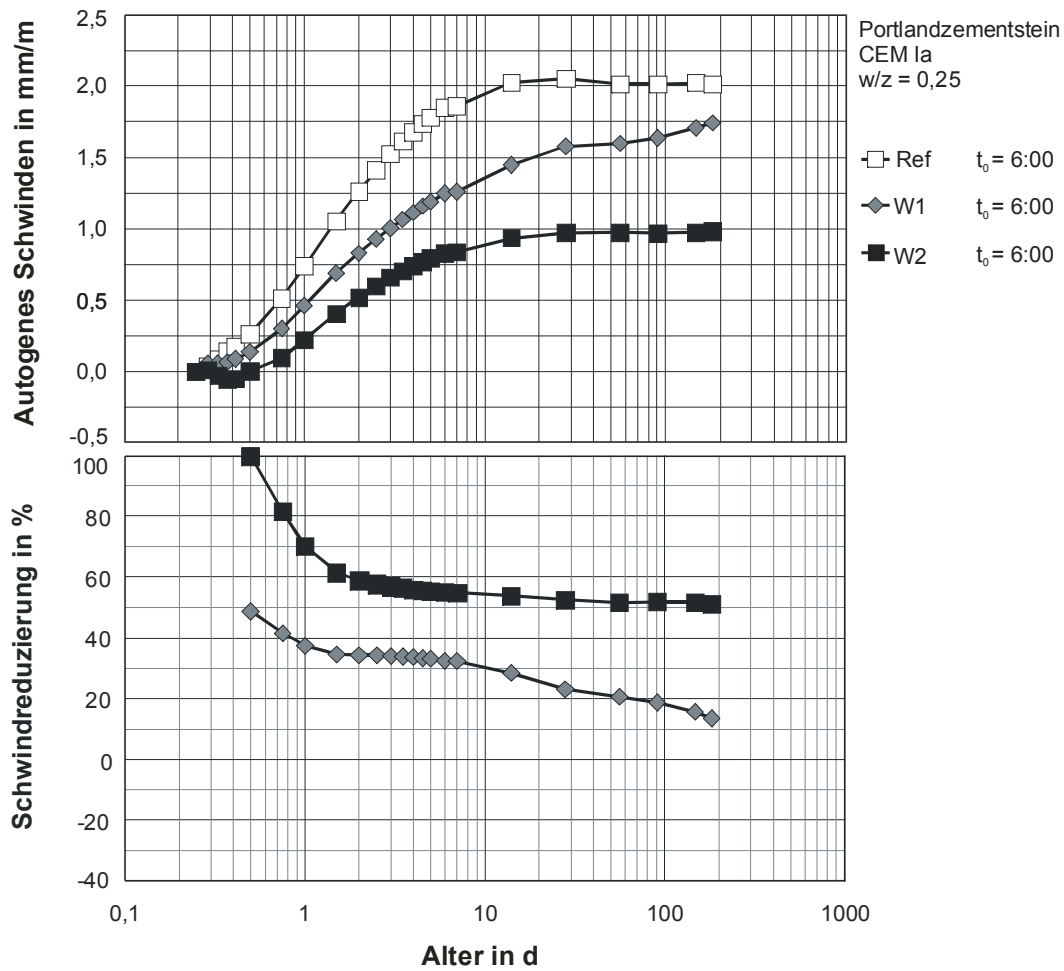


Bild B-13 Autogenes Schwinden (oben) und Schwindreduzierung (unten) von Portlandzementstein CEM Ia mit w/z = 0,25 und mit den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA bzw. W)

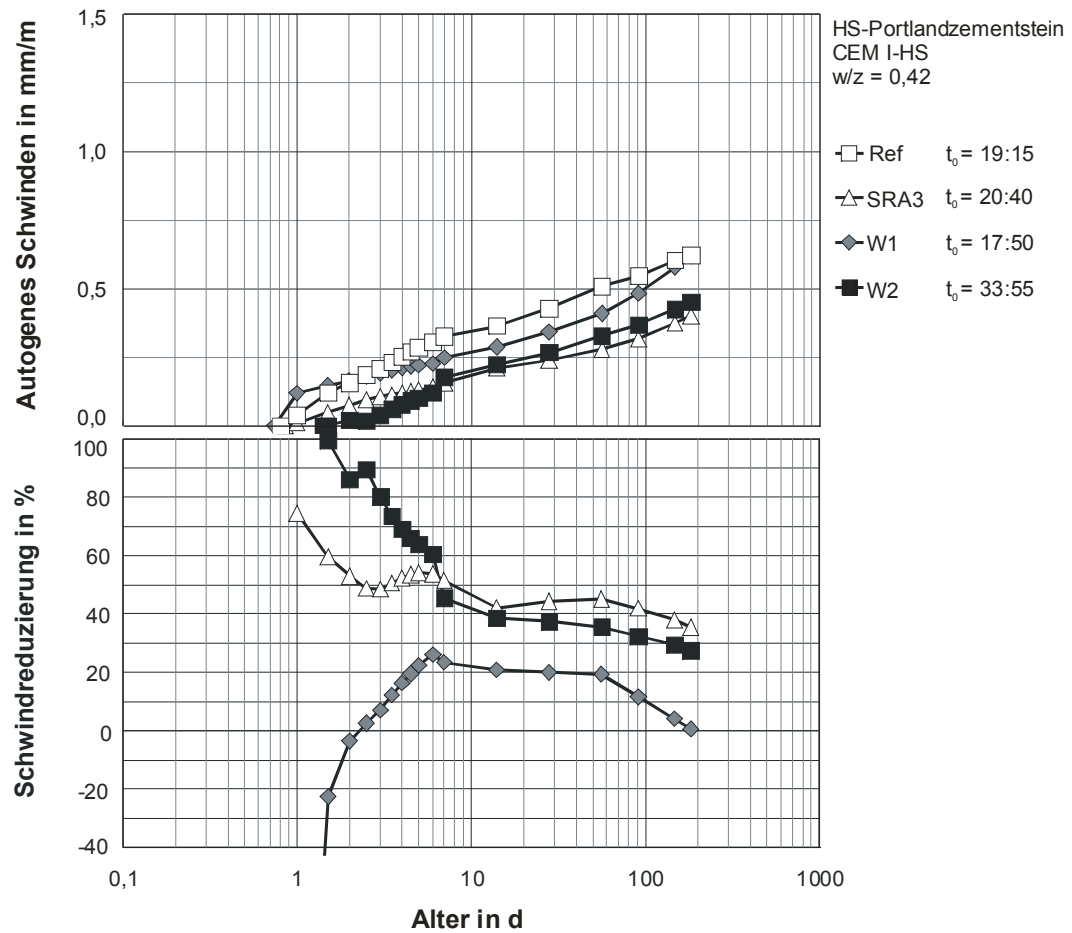


Bild B-14 Autogenes Schwinden (oben) und Schwindreduzierung (unten) von HS-Portlandzementstein CEM I-HS mit $w/z = 0,42$ und mit Schwindreduzierer SRA3 sowie den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA bzw. W)

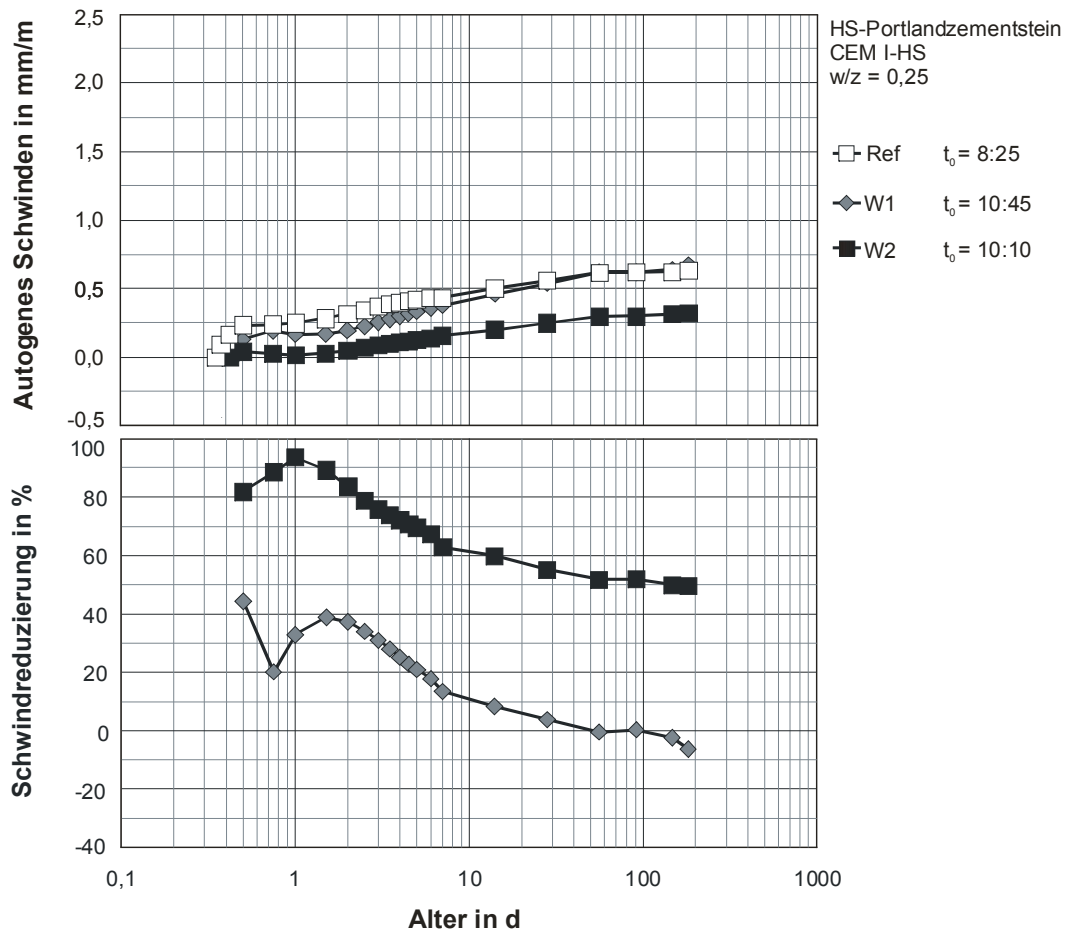


Bild B-15 Autogenes Schwinden (oben) und Schwindreduzierung (unten) von Zementstein mit HS-Portlandzement CEM I-HS mit w/z = 0,25 und mit den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

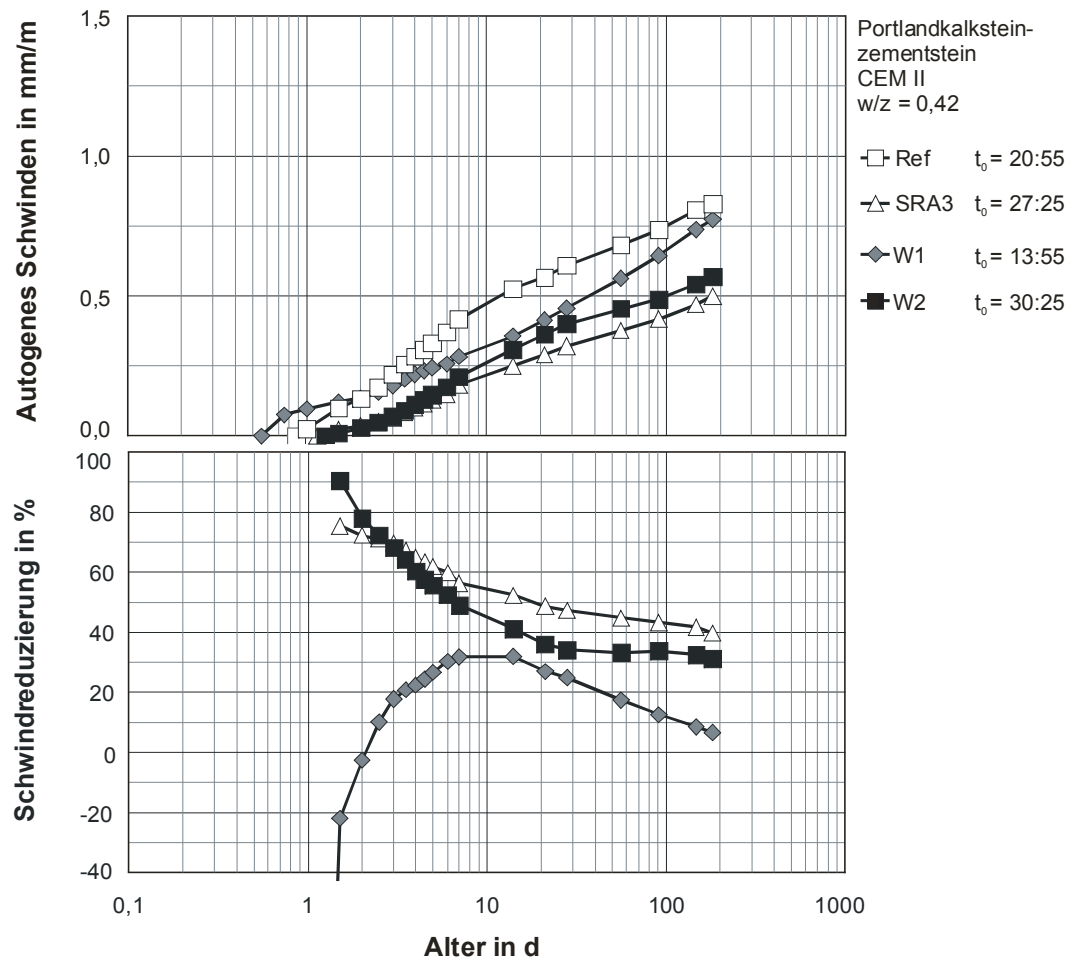


Bild B-16 Autogenes Schwinden (oben) und Schwindreduzierung (unten) von Portlandkalksteinzementstein CEM II mit $w/z = 0,42$ und Schwindreduzierer SRA3 sowie den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA bzw. W)

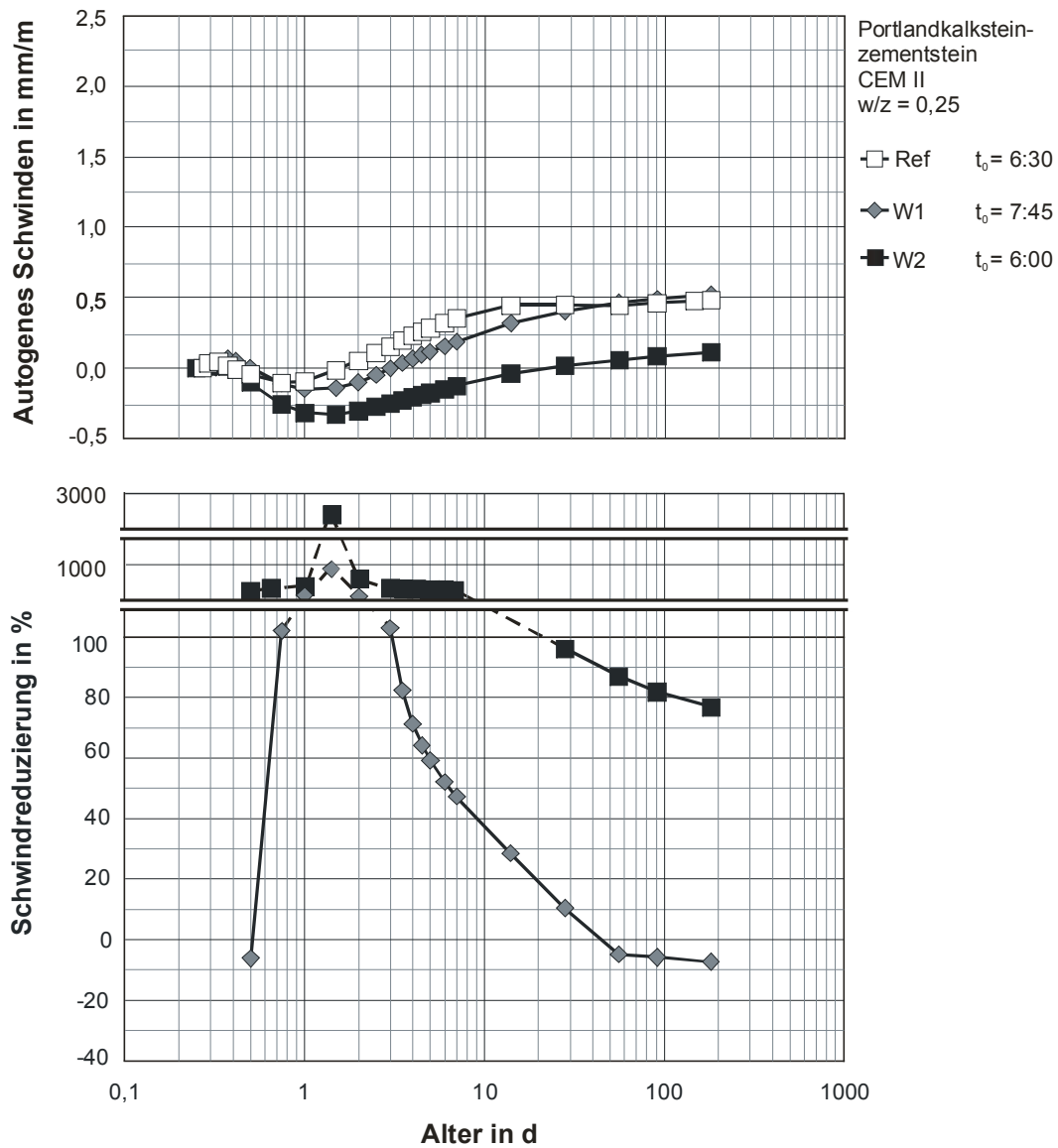


Bild B-17 Autogenes Schwinden (oben) und Schwindreduzierung (unten) von Portlandkalksteinzementstein CEM II mit w/z = 0,25 und den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

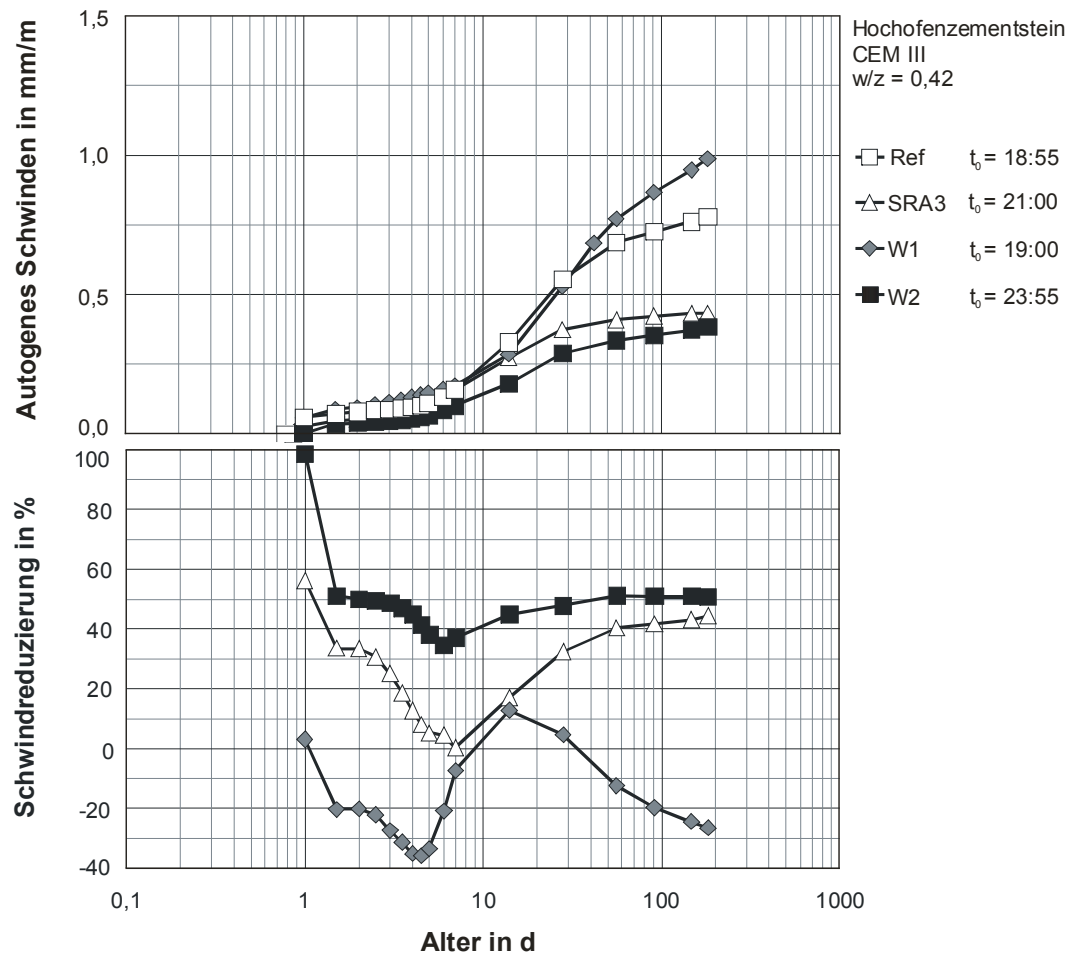


Bild B-18 Autogenes Schwinden (oben) und Schwindreduzierung (unten) von Hochofenzementstein CEM III mit $w/z = 0,42$ und mit Schwindreduzierer SRA3 sowie den Wirkstoffen W1 und W2, Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA bzw. W)

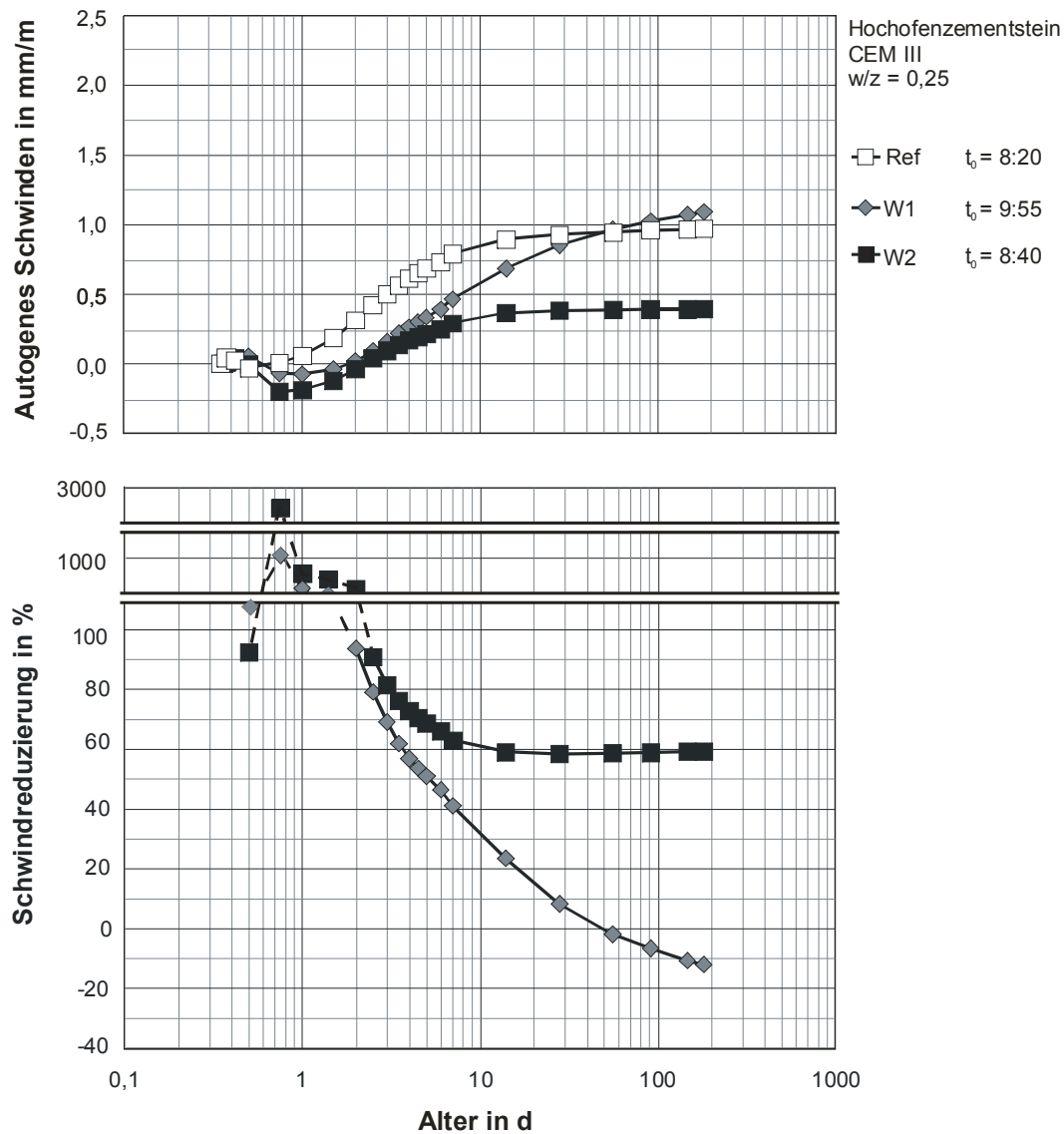


Bild B-19 Autogenes Schwinden (oben) und Schwindreduzierung (unten) von Hochofenzementstein CEM III mit w/z = 0,25 und den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

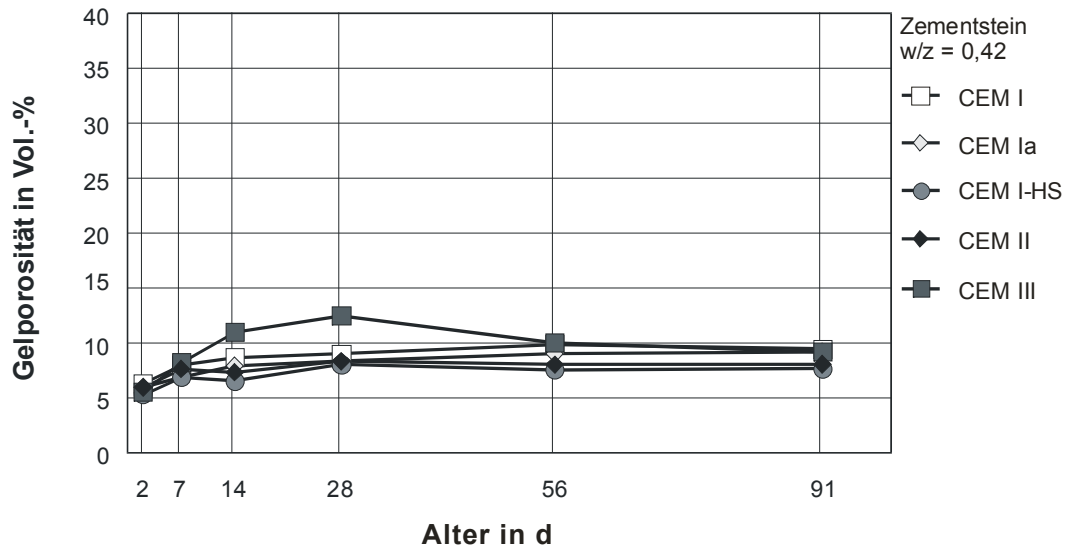


Bild B-20 Gelporosität der Zementsteine mit den Zementen CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III mit w/z = 0,42 ohne Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff

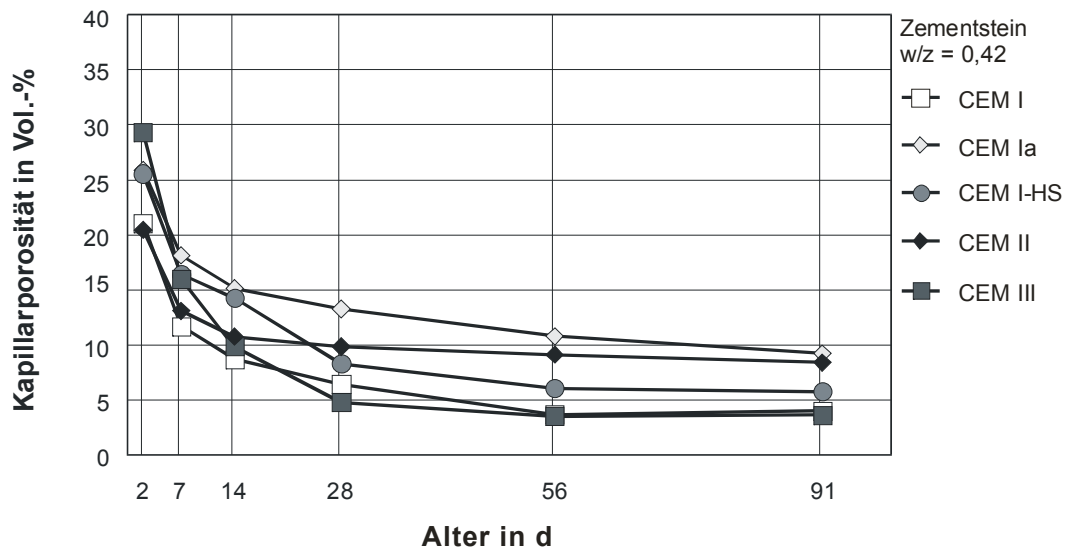


Bild B-21 Kapillarporosität der Zementsteine mit den Zementen CEM I, CEM Ia, CEM I-HS, CEM II und CEM III mit w/z = 0,42 ohne Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff

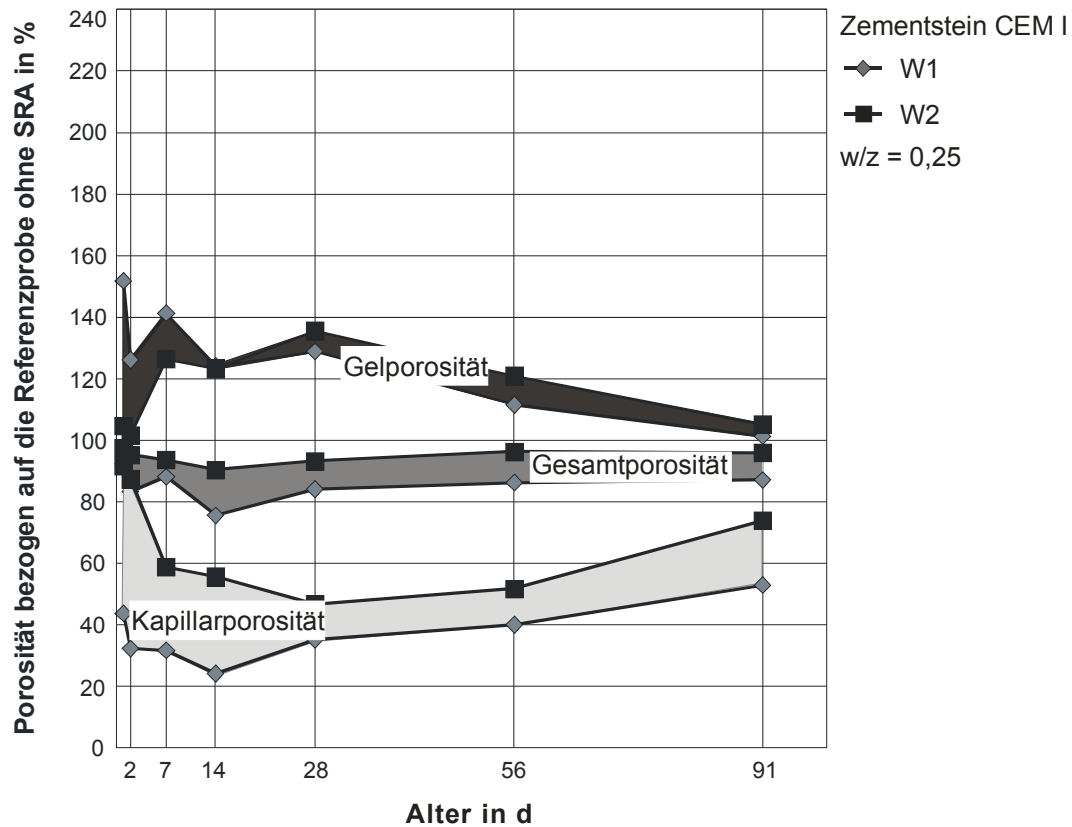


Bild B-22 Einfluss der Wirkstoffe W1 und W2 auf die Porosität von Zementstein CEM I mit w/z = 0,25; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

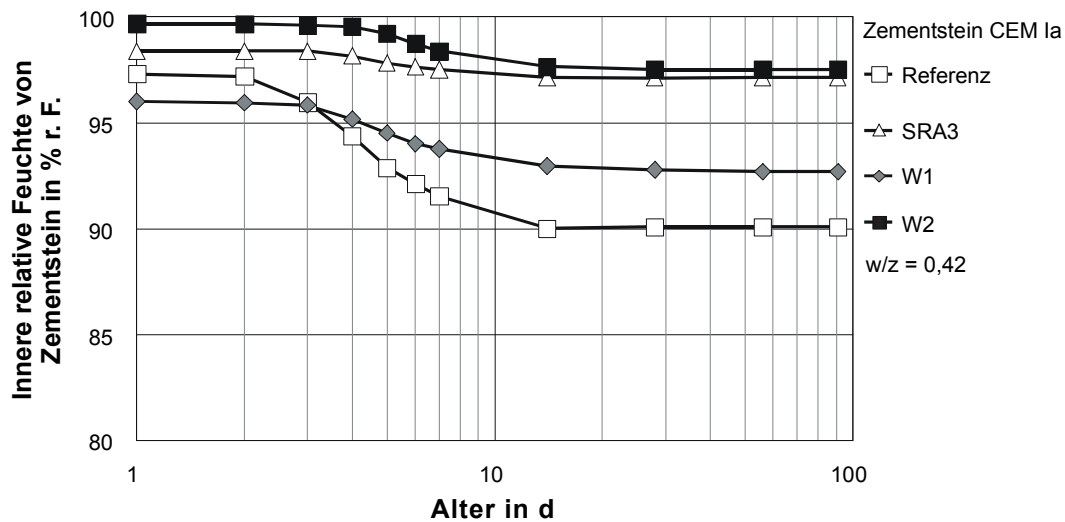


Bild B-23 Innere relative Feuchte von Zementstein CEM Ia mit w/z = 0,42 sowie Schwindreduzierer SRA3 und den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA bzw. W)

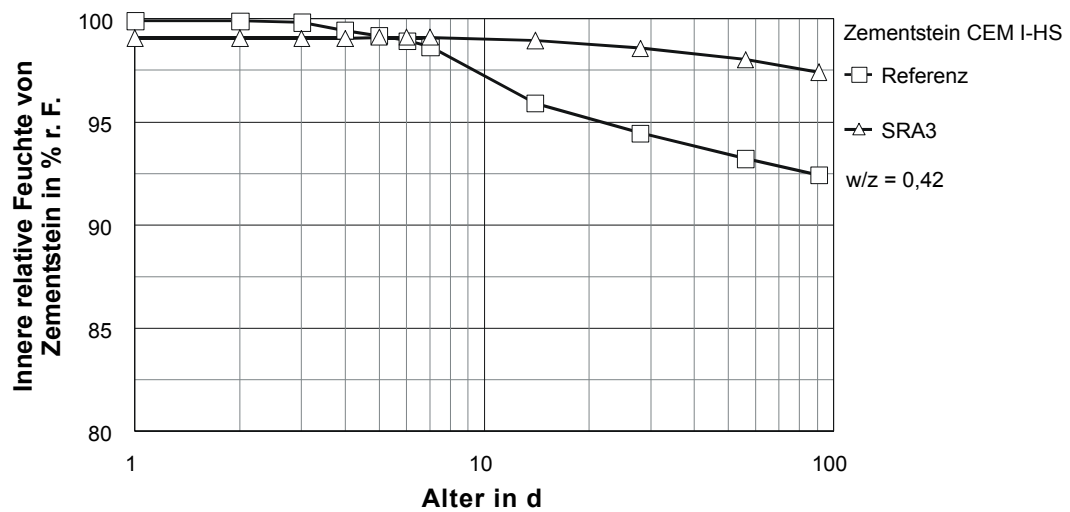


Bild B-24 Innere relative Feuchte von Zementstein CEM I-HS mit $w/z = 0,42$ und Schwindreduzierer SRA3; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

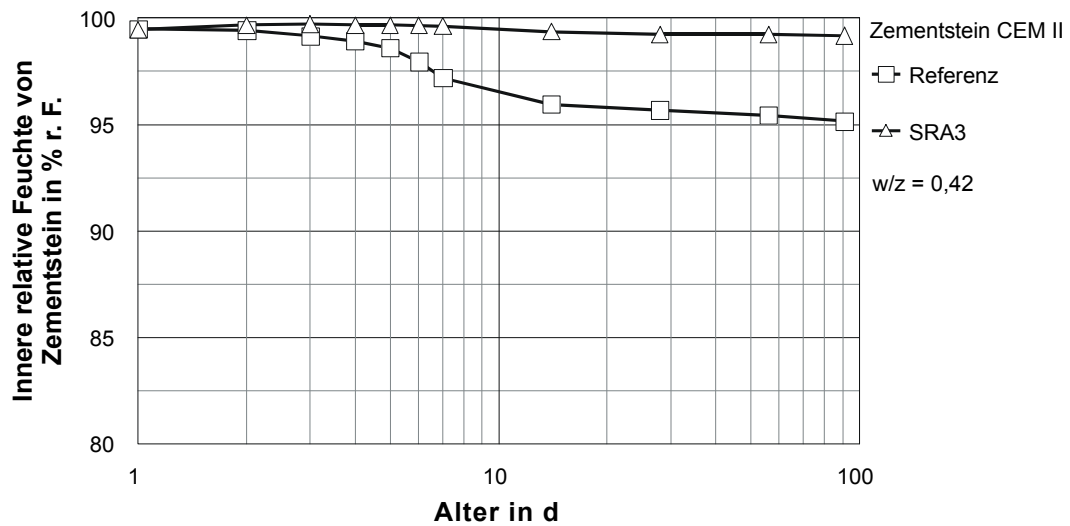


Bild B-25 Innere relative Feuchte von Zementstein CEM II mit $w/z = 0,42$ und Schwindreduzierer SRA3; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

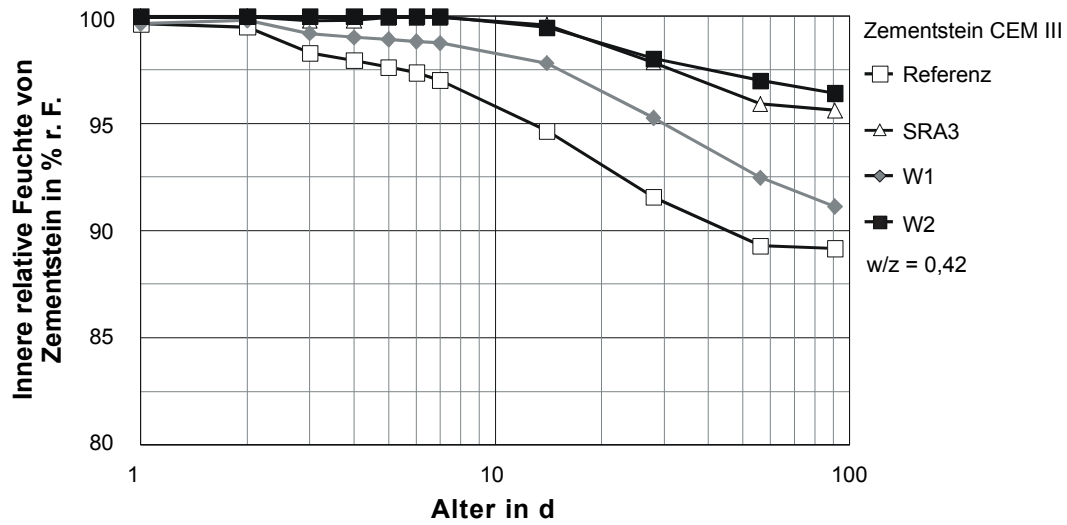


Bild B-26 Innere relative Feuchte von Zementstein CEM III mit $w/z = 0,42$ und Schwindreduzierer SRA3 sowie den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w. (SRA bzw. W)

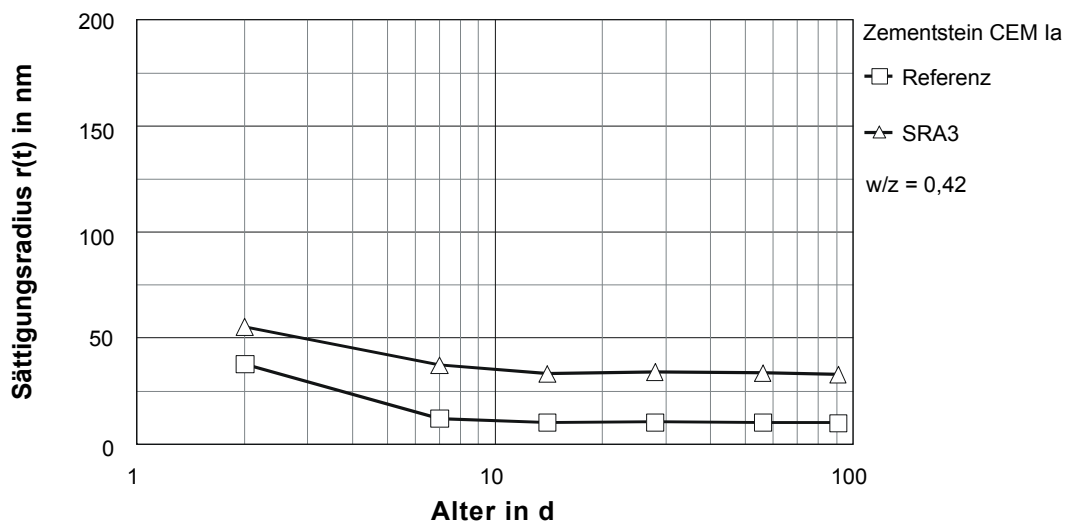


Bild B-27 Sättigungsradien in Zementstein CEM Ia mit $w/z = 0,42$ und Schwindreduzierer SRA3; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

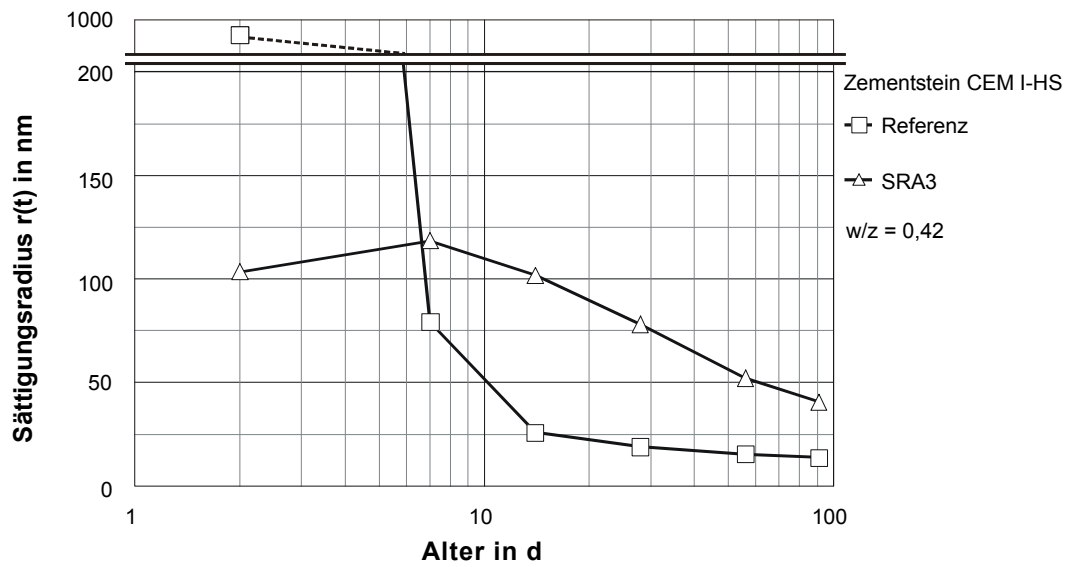


Bild B-28 Sättigungsradien in Zementstein CEM I-HS mit $w/z = 0,42$ und Schwindreduzierer SRA3;
 Dosierung: 4,5 M.-% v. w

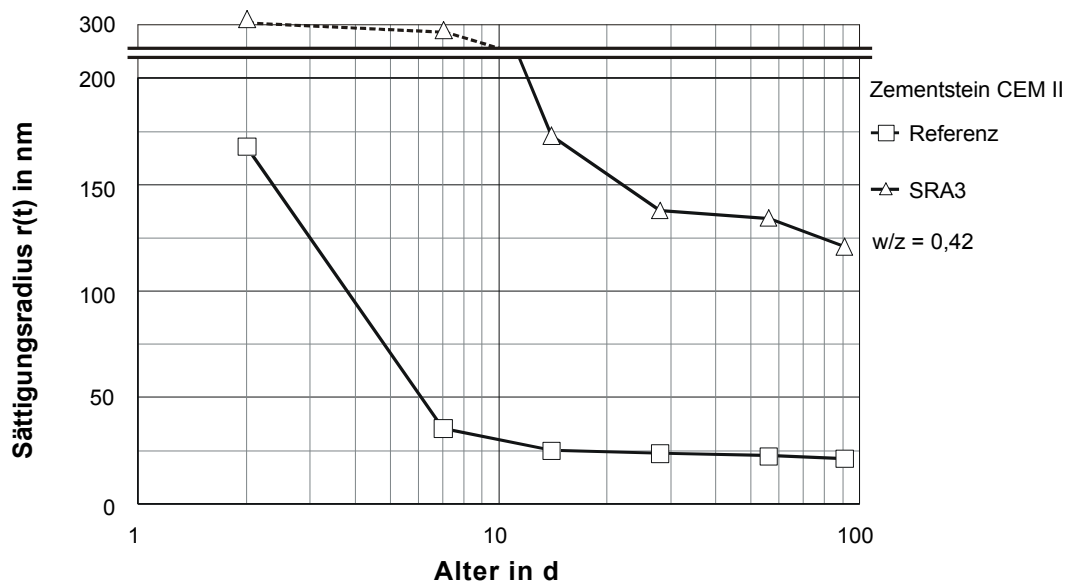


Bild B-29 Sättigungsradien in Zementstein CEM II mit $w/z = 0,42$ und Schwindreduzierer SRA3;
 Dosierung: 4,5 M.-% v. w

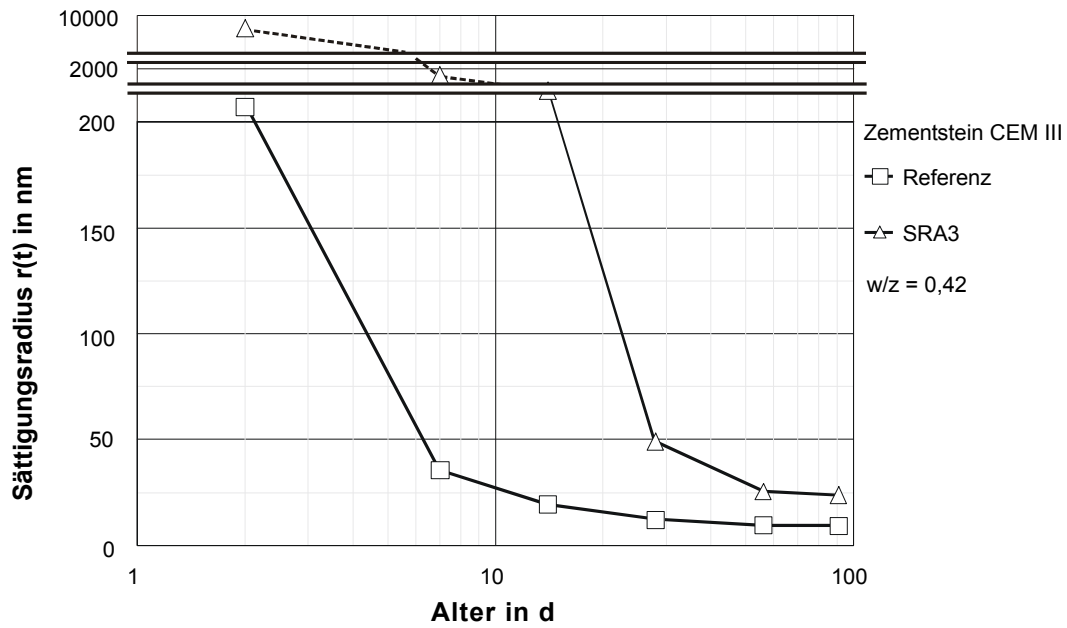


Bild B-30 Sättigungsradien in Zementstein CEM III mit $w/z = 0,42$ und Schwindreduzierer SRA3; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

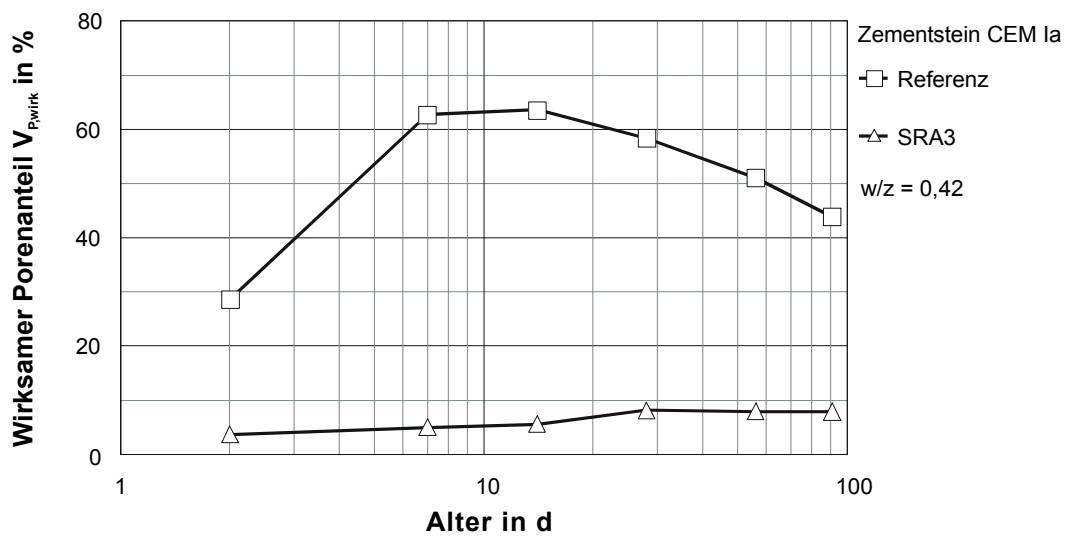


Bild B-31 Durch Selbstaustrocknung wirksamer Porenanteil in Zementstein CEM Ia mit $w/z = 0,42$ und Schwindreduzierer SRA3; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

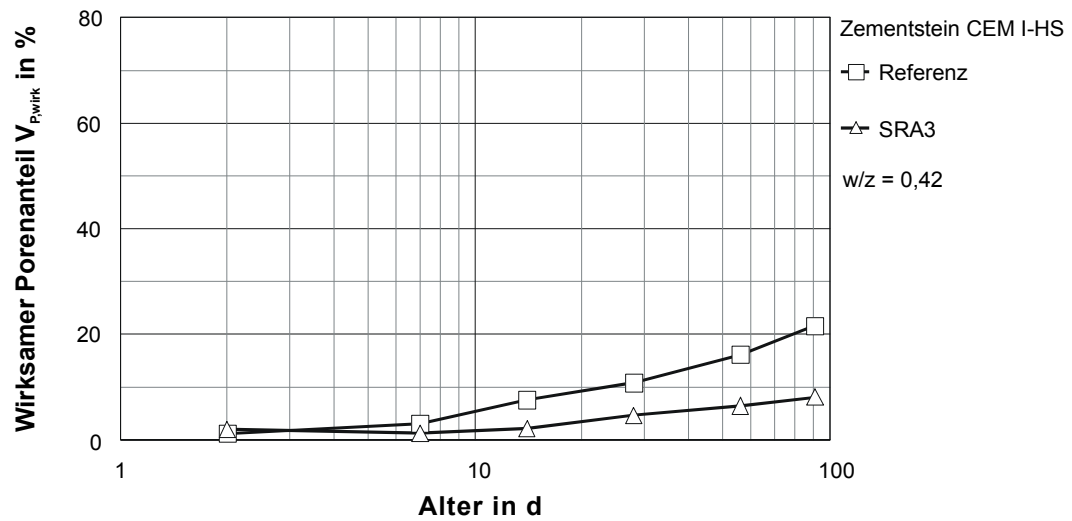


Bild B-32 Durch Selbstaustrocknung wirksamer Porenanteil in Zementstein CEM I-HS mit $w/z = 0,42$ und Schwindreduzierer SRA3; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

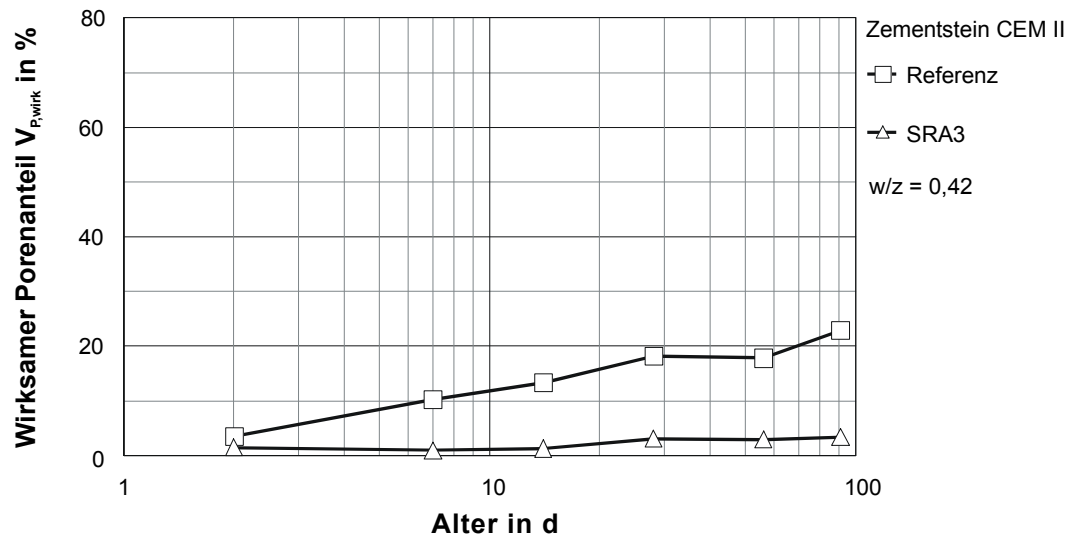


Bild B-33 Durch Selbstaustrocknung wirksamer Porenanteil in Zementstein CEM II mit $w/z = 0,42$ und Schwindreduzierer SRA3; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

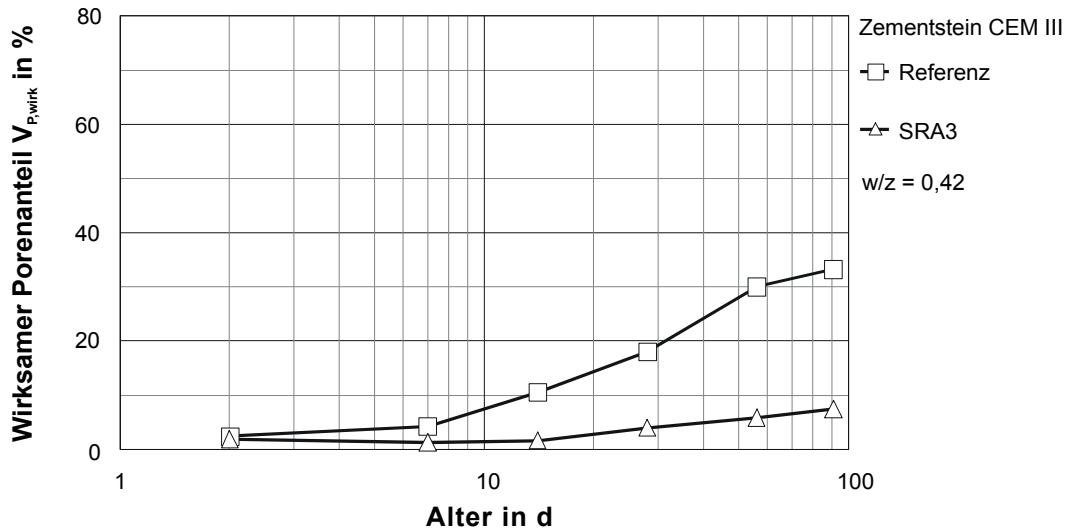


Bild B-34 Durch Selbsttrocknung wirksamer Porenanteil in Zementstein CEM III mit $w/z = 0,42$ und Schwindreduzierer SRA3; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

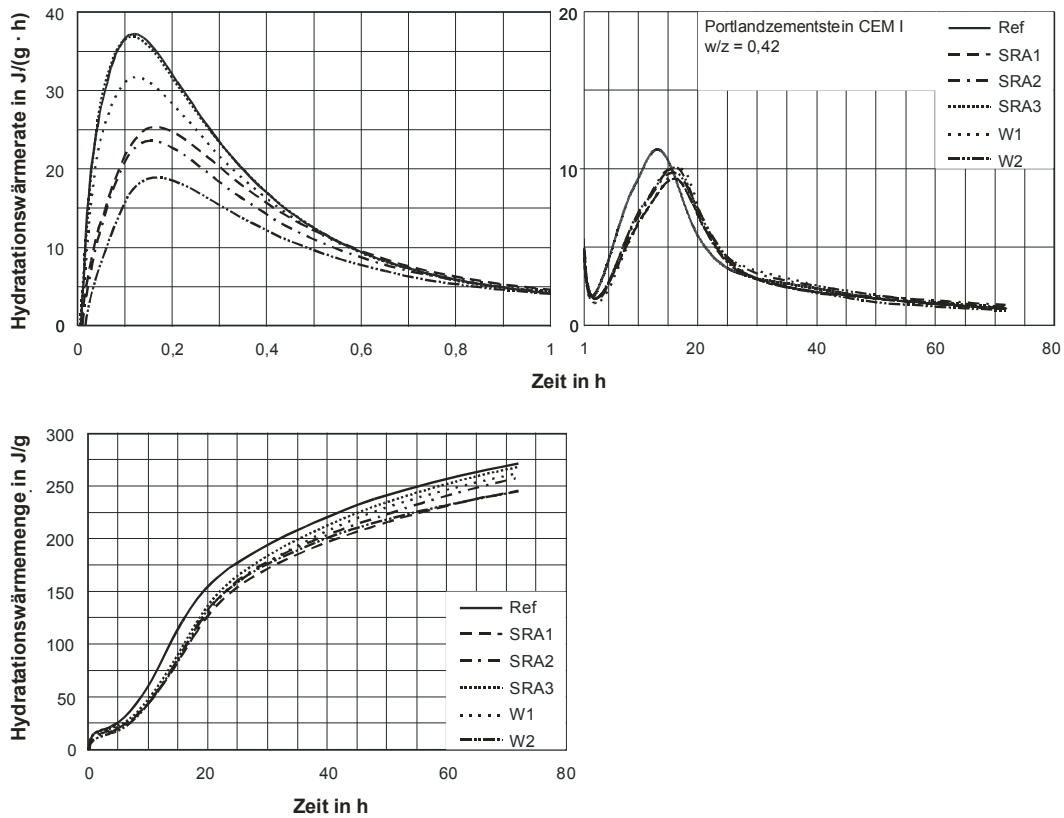


Bild B-35 Hydrationswärmerraten (oben) und –mengen (unten) über einen Zeitraum von 72 Stunden von Portlandzement CEM I $w/z = 0,42$ und den Schwindreduzierern SRA1, SRA2, SRA3 sowie den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA bzw. W)

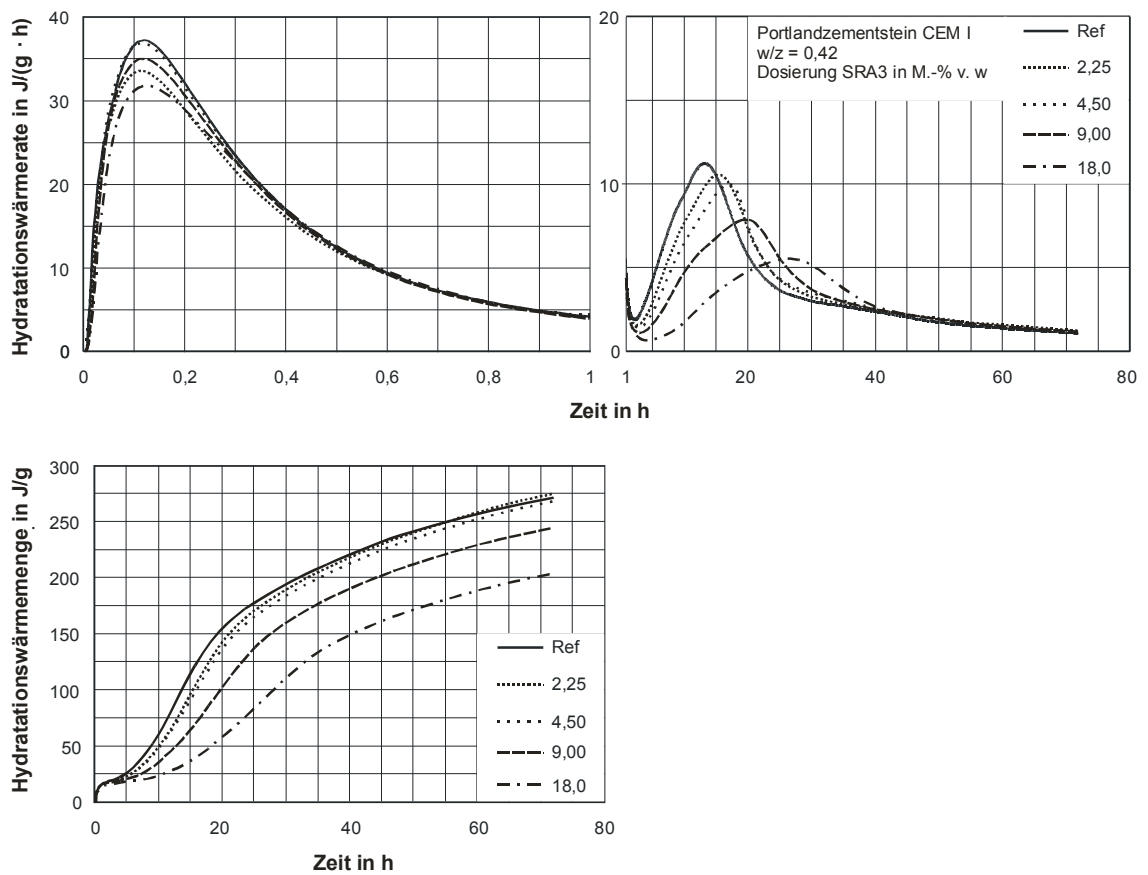


Bild B-36 Hydrationswärmeraten (oben) und –mengen (unten) über einen Zeitraum von 72 Stunden von Portlandzement CEM I $w/z = 0,42$ und Schwindreduzierer SRA3; Dosierung: 2,25; 4,5; 9,0 und 18,0 M.-% v. w

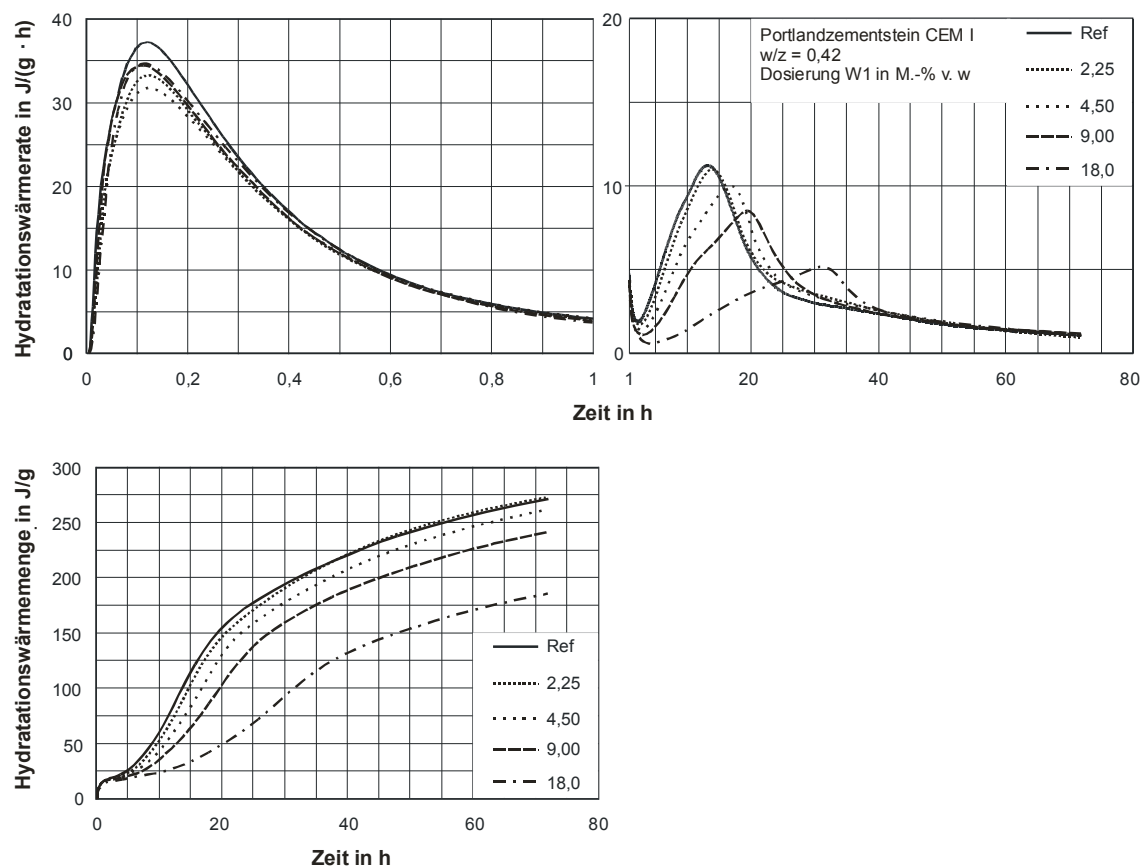


Bild B-37 Hydrationswärmeraten (oben) und –mengen (unten) über einen Zeitraum von 72 Stunden von Portlandzement CEM I mit $w/z = 0,42$ und Wirkstoff W1; Dosierung: 2,25; 4,5; 9,0 und 18,0 M.-% v. w

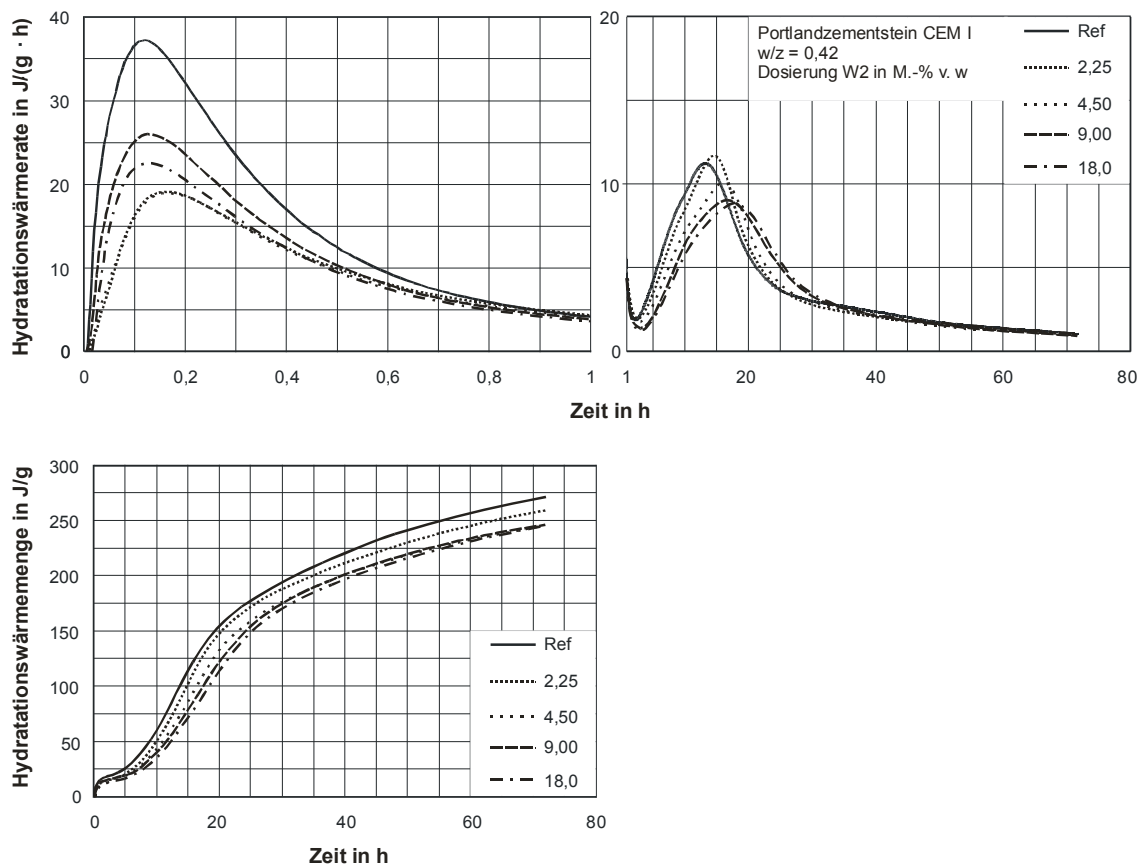


Bild B-38 Hydrationswärmeraten (oben) und –mengen (unten) über einen Zeitraum von 72 Stunden von Portlandzement CEM I mit $w/z = 0,42$ und Wirkstoff W2; Dosierung: 2,25; 4,5; 9,0 und 18,0 M.-% v. w

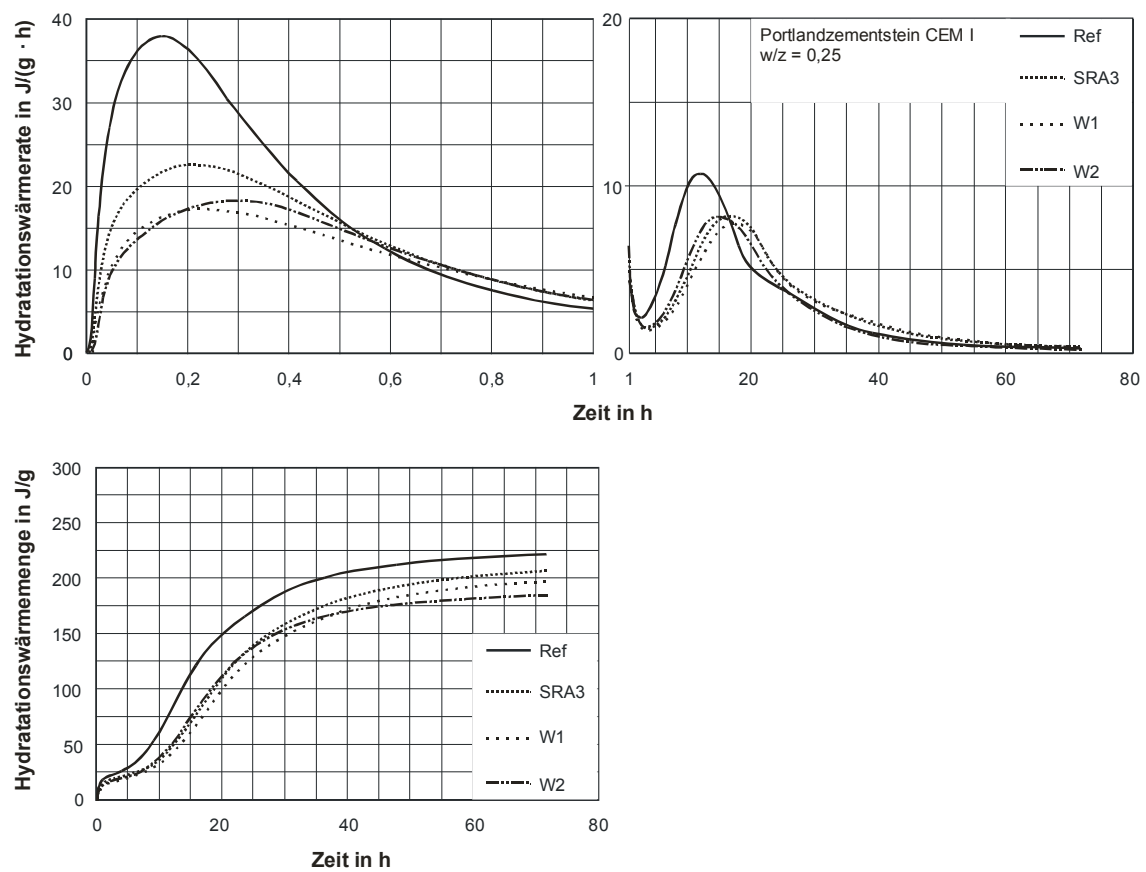
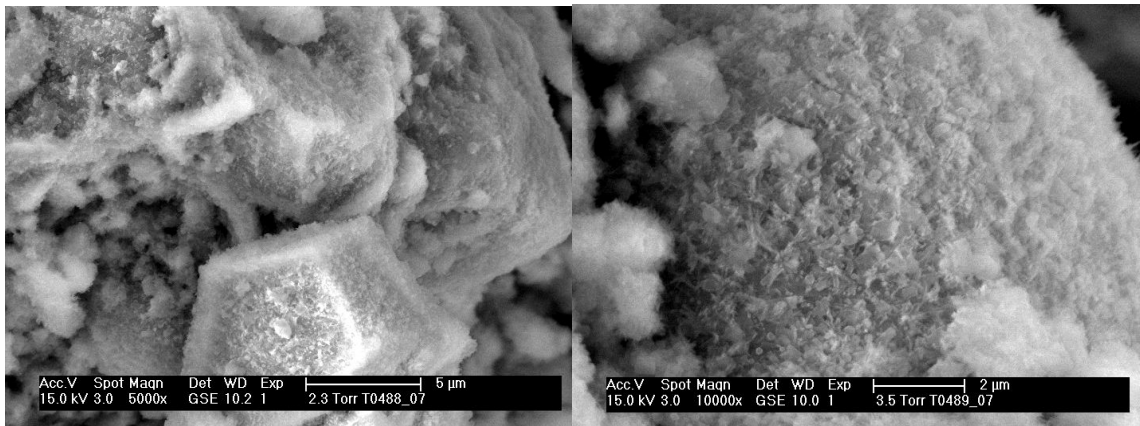
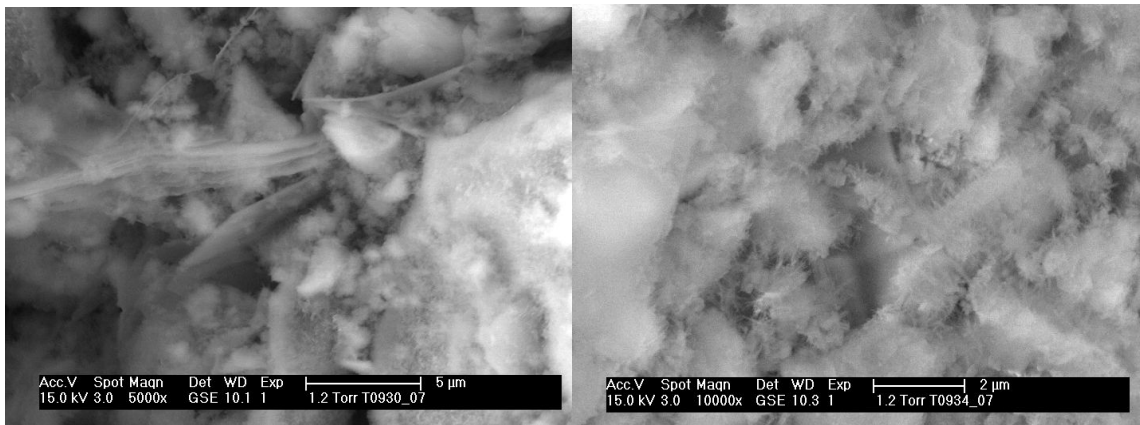


Bild B-39 Hydrationswärmeraten (oben) und –mengen (unten) über einen Zeitraum von 72 Stunden von Portlandzement CEM I mit $w/z = 0,25$ und Schwindreduzierer SRA3 sowie den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w (SRA bzw. W)

Referenz



Wirkstoff W1



Wirkstoff W2

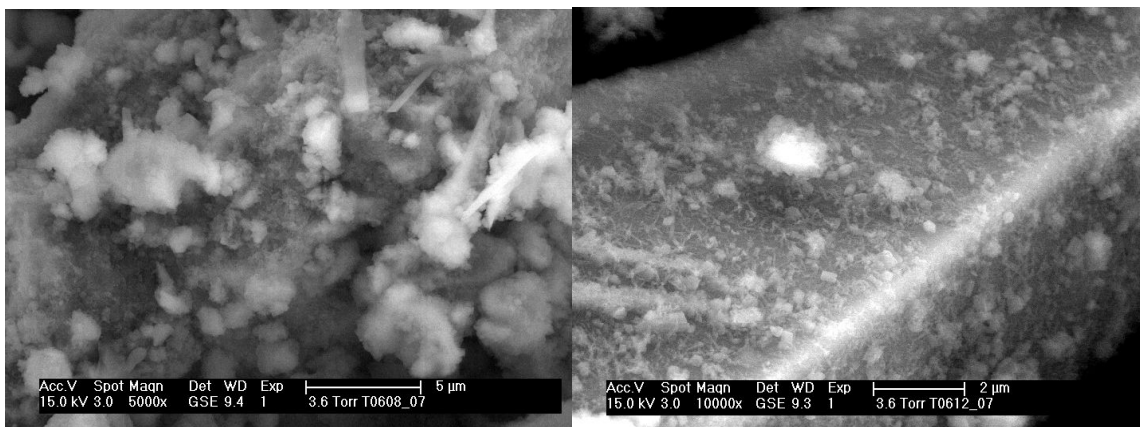
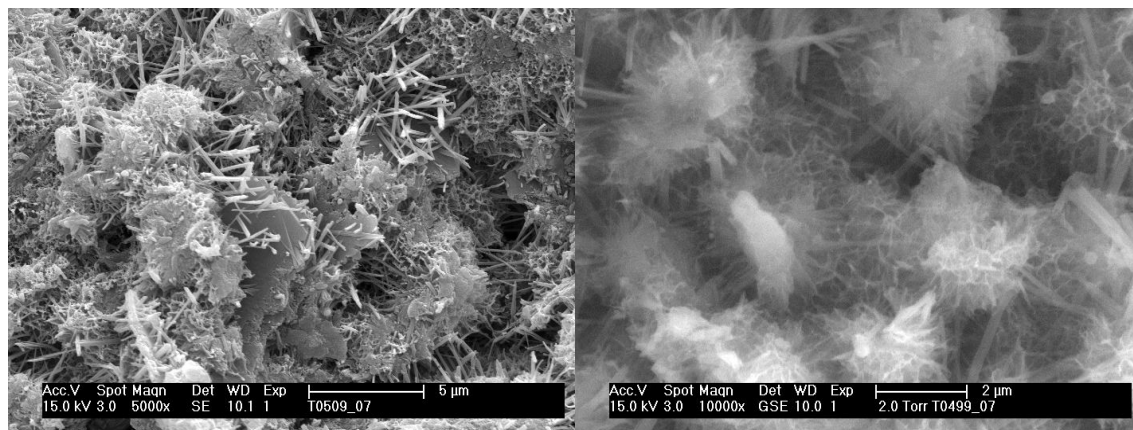
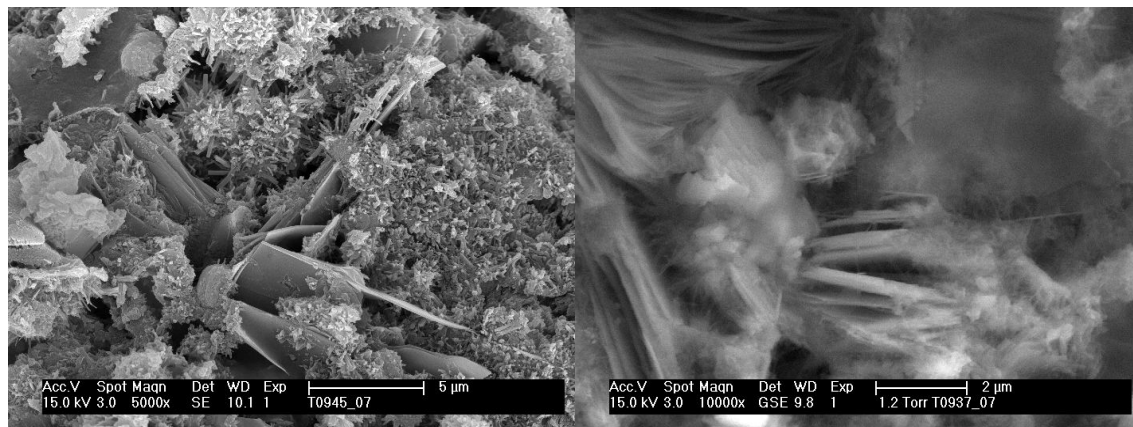


Bild B-40 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen im Alter von sechs Stunden von Portlandzement CEM I mit $w/z = 0,42$ und den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

Referenz



Wirkstoff W1



Wirkstoff W2

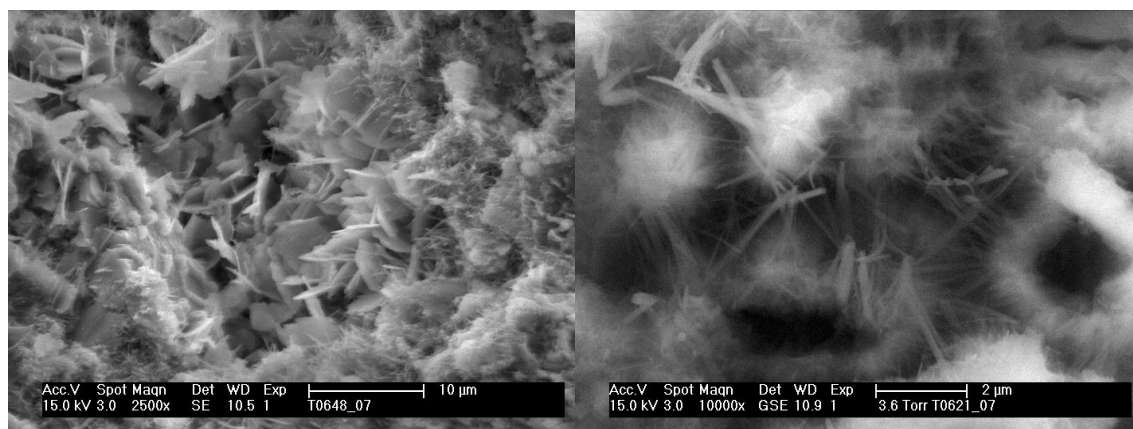
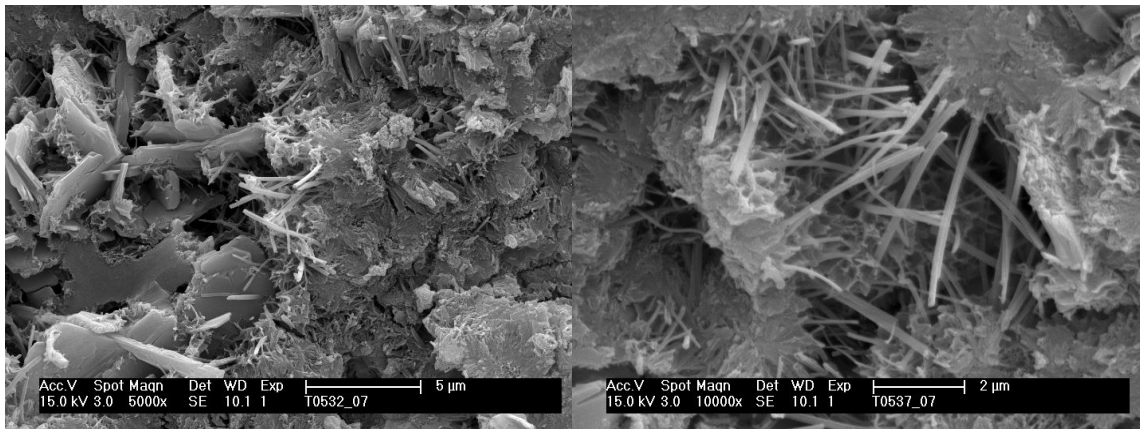


Bild B-41 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen im Alter von 24 Stunden von Portlandzement CEM I mit $w/z = 0,42$ und den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

Referenz



Wirkstoff W1

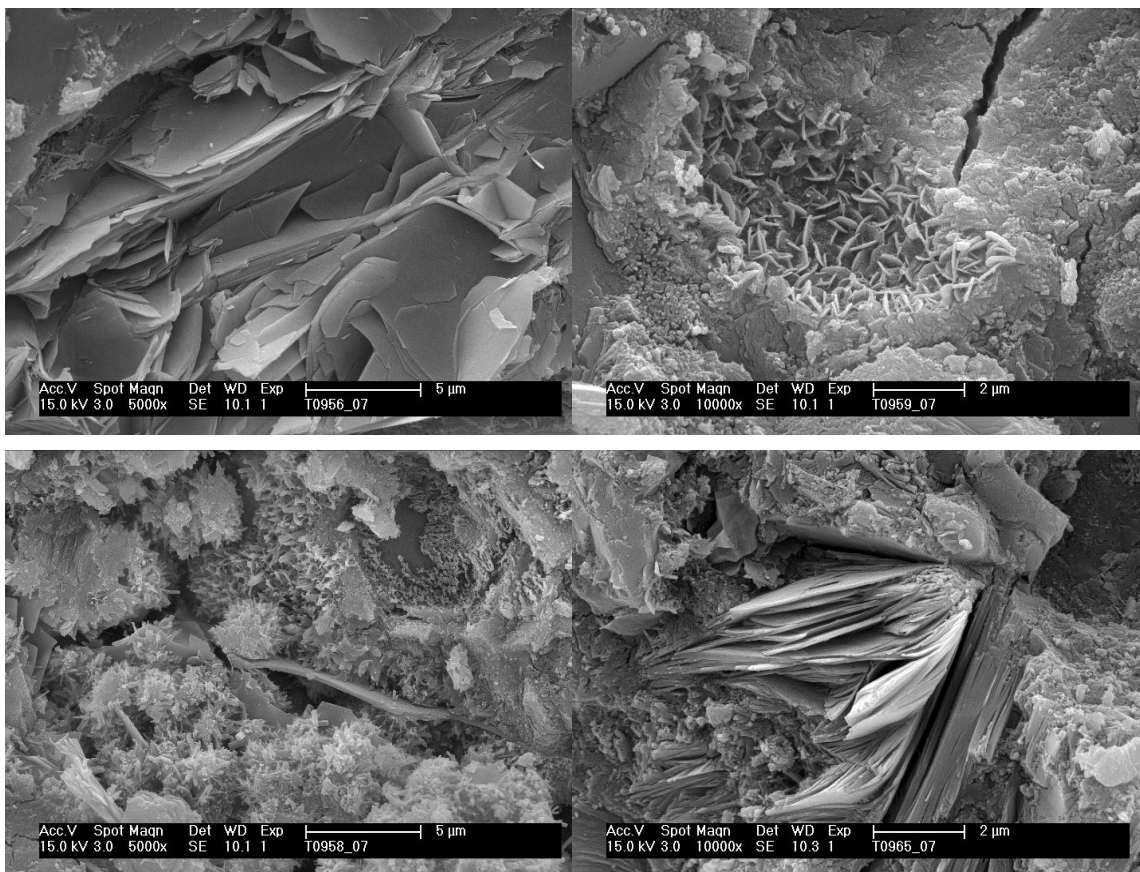
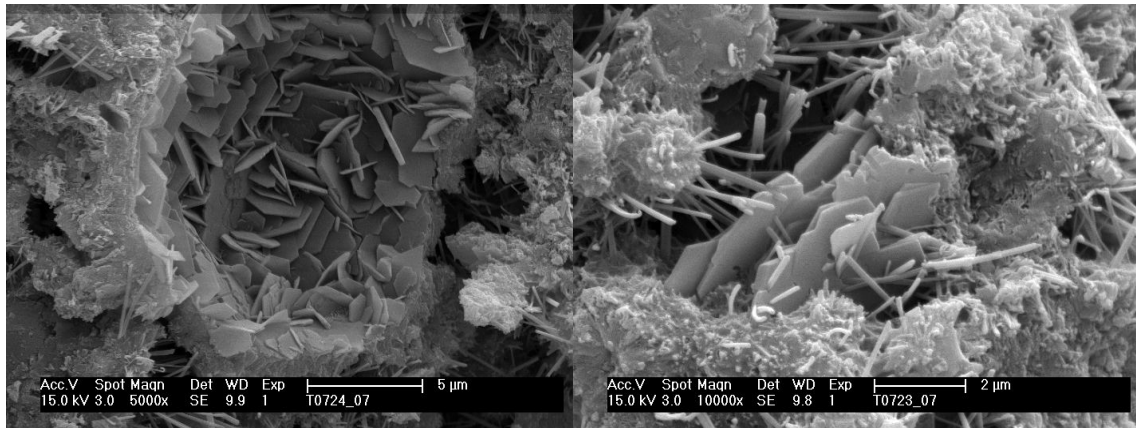


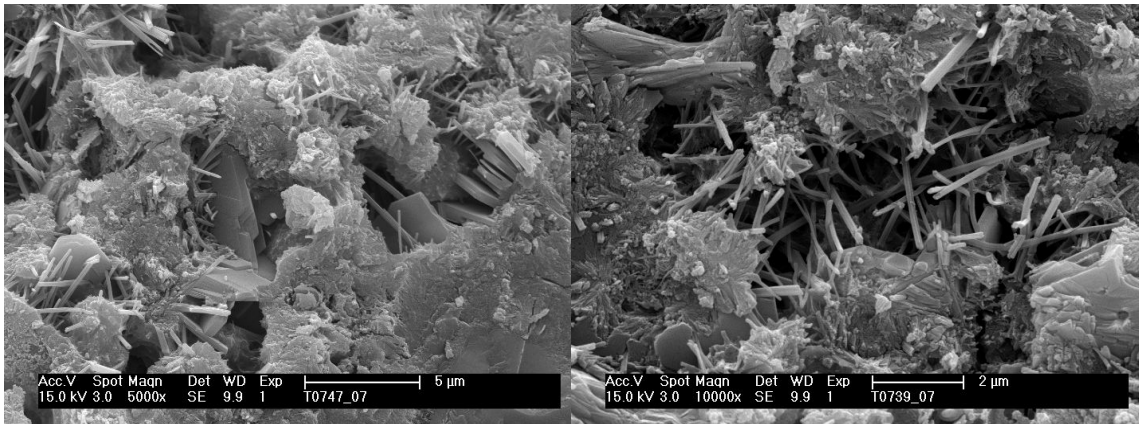
Bild B-42 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen im Alter von sieben Tagen von Portlandzement CEM I mit $w/z = 0,42$ und den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w

Wirkstoff W2

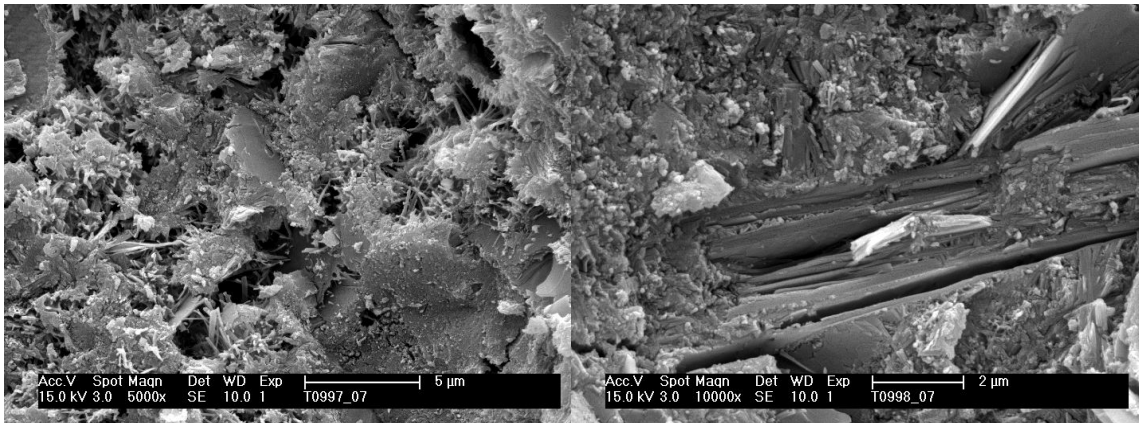


Fortsetzung Bild B-42 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen im Alter von sieben Tagen von Portlandzement CEM I $w/z = 0,42$ und den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M. % v. w

Referenz



Wirkstoff W1



Wirkstoff W2

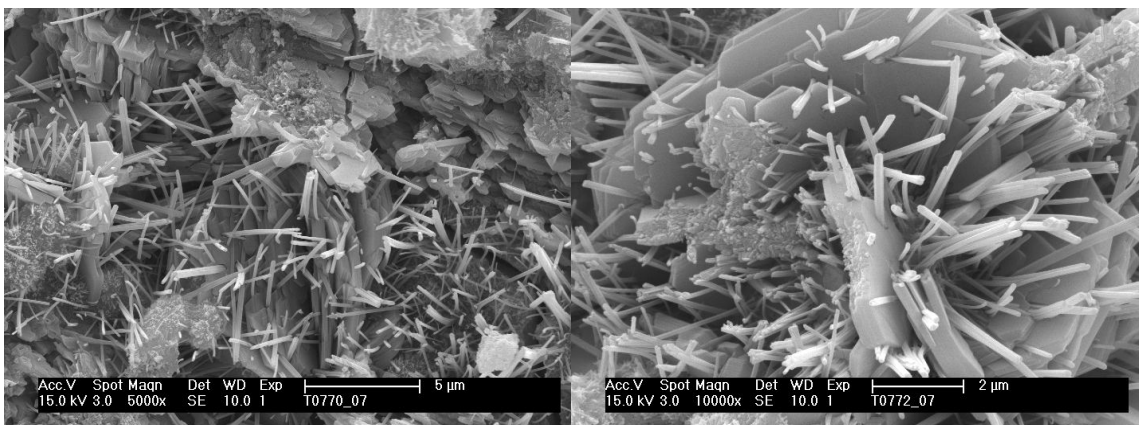


Bild B- 43 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen im Alter von 28 Tagen von Portlandzement CEM I mit $w/z = 0,42$ und den Wirkstoffen W1 und W2; Dosierung: 4,5 M.-% v. w